

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Student:
Zvonimir Petković

Zagreb, 2013.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Voditeljica rada:
Prof.dr.sc. Biserka Runje

Student:
Zvonimir Petković

Zagreb, 2013.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **ZVONIMIR PETKOVIĆ** Mat. br.: 0035163187

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **PRAKTIČNA REALIZACIJA DEFINICIJE METRA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **PRACTICAL REALIZATION OF THE DEFINITION OF THE METRE**

Opis zadatka:

1. Navesti temeljna obilježja hrvatskog mjeriteljskog sustava i mjeriteljske infrastrukture na području realizacije osnovnih SI jedinica.
2. Opisati povijesni razvoj definicije metra s naglaskom na mjernu nesigurnost rezultata mjerenja. Definirati metode i vrste zračenja za praktičnu realizaciju definicije metra. Prikazati na koji način Republika Hrvatska osigurava sljedivost do definicije metra.

Zadatak zadan:
16. studenog 2012.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Biserka Runje

Rok predaje rada:
1. rok: 15. veljače 2013.
2. rok: 11. srpnja 2013.
3. rok: 13. rujna 2013.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 27., 28. veljače i 1. ožujka 2013.
2. rok: 15., 16. i 17. srpnja 2013.
3. rok: 18., 19., i 20. rujna 2013.
Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

ZAHVALA

Prije svega se zahvaljujem mentorici, prof.dr.sc. Biserki Runje na nebrojenim savjetima, stručnom mišljenju i ustupljenoj literaturi te kontinuiranoj podršci tijekom izrade ovog rada

Zahvaljujem se i dipl.ing Marku Katiću na savjetima i objašnjenjima interferometrije planparalelnih graničnih mjerki.

Gospođi Tijani Parlić-Risović se zahvaljujem na ustupljenim materijalima što se tiče Nacionalnog umjernog laboratorija za masu, na iscrpnom objašnjenju i brzom odgovoru na moj upit.

Za kraj, zahvaljujem se i svojoj obitelji na moralnoj podršci i toleranosti na moje dobre i loše dane.

SAŽETAK

U ovome radu su kroz povijesni i tehnički okvir obrađeni razni načini mjerenja duljine, kao i put koji je čovječanstvo moralo proći da bi došlo do prve definicije metra.

Kroz opis raznih metoda mjerenja duljine i načina ostvarivanja međunarodnih mjera metra; prikazan je kroz tehnički, društveni i znanstveni okvir utjecaj koji je takvo otkriće donijelo. Obrađene su sve glavne točke koje je mjeriteljstvo morali proći da bi došlo do današnje definicije metra putem brzine svjetlosti u vakuumu. Opisan je način proizvodnje prvih artefakata, izazove koji su bili stavljeni pred tadašnje najbolje znanstvenike i tehničare svijeta. Velika prekretnica u mjeriteljstvu je bila otkriće interferometra, pa je opisan i način rada tog uređaja. Današnja definicija metra se i dalje temelji na interferometriji, ali uz laserski sustav pa je sukladno tome opisan i rad lasera i sustava temeljenog na njemu kako bi se u cijelosti dobila slika o tome koliko je to složen i sofisticiran proces.

Na kraju, dat je pregled ustroja mjeriteljskog sustava i infrastrukture u Republici Hrvatskoj kroz sve najvažnije ustanove koje ga čine. Za realiziranje osnovnih SI jedinica su odgovorne upravo te ustanove, te su dane specifikacije svih laboratorija koji imaju sposobnost održavati primarne ili sekundarne etalone osnovnih SI jedinica u Republici Hrvatskoj.

SADRŽAJ

ZAHVALA	3
SAŽETAK	4
POPIS SLIKA	7
POPIS TABLICA	9
1 UVOD.....	10
2 RAZVOJ MJERITELJSTVA DO 18. STOLJEĆA.....	11
2.1 Egipat	11
2.2 Babilon	12
2.3 Grčka i Rimsko carstvo.....	12
2.4 Kina	14
2.5 Srednji vijek	14
2.5.1 Engleska	15
2.6 Sjedinjene Američke Države.....	16
3 PUT DO PRVE DEFINICIJE METRA.....	17
3.1 Mjerenje meridijana	18
3.1.1 Ličnosti zaslužne za razvoj novog mjernog uređaja	19
3.1.2 Novi mjerni uređaj	19
3.1.3 Način rada ponavljajućeg kruga.....	20
3.1.4 Značaj i način mjerenja ponavljajućim krugom.....	22
3.2 Ekspedicija Dunkirk-Barcelona	25
3.2.1 Triangulacija.....	26
3.2.2 Tijek mjerenja meridijana	27
3.2.3 Prikrivena pogreška	28
3.2.4 Konačna definicija metra.....	28
3.3 Prihvaćanje metričkog mjernog sustava	29
4 PRAMJERA METRA	32
5 DEFINIRANJE METRA VALNOM DULJINOM.....	35
5.1 Michelsonov interferometar	38
5.1.1 Princip rada Michelsonovog interferometra	40
6 AKTUALNA DEFINICIJA METRA	43
6.1 Kratak uvod u princip rada lasera	44
6.2 Helij-neon laser.....	45
6.2.1 Podrobniji opis helij-neon lasera	45
6.2.2 Modovi helij-neon lasera	48
6.3 Jedno stabilizirani helij-neon laser.....	51
6.3.1 Postizanje stabilnosti lasera.....	52
7 PLANPARALELNE GRANIČNE MJERKE	55
7.1 Povijesni razvoj etalona	55
7.1.1 Metode mjerenja prije pojave etalona	55
7.1.2 Pronalazak etalona	57
7.2 Normizacija etalona	59

7.2.1	ISO 3650.....	59
7.3	Materijali.....	60
7.3.1	Čelik.....	60
7.3.2	Karbidi.....	60
7.3.3	Kvarc.....	60
7.3.4	Keramika.....	61
7.4	Ravnost i paralelnost etalona	61
7.4.1	Mjerenje odstupanja od ravnosti	61
7.4.2	Mjerenje odstupanja od paralelnosti interferometrom	62
7.4.3	Mjerenje odstupanja od paralelnosti komparatorom	63
7.5	Linearni koeficijent temperaturnog rastezanja etalona	64
7.6	Prionjivost.....	66
7.7	Duljina	66
7.8	Interferometrijska metoda mjerenja duljine etalona	67
7.8.1	Korekcije mjerenja	69
7.8.2	Mjerna nesigurnost	70
7.9	Sljedivost.....	72
7.10	Zaključno o etalonima	73
8	MJERITELJSKA INFRASTRUKTURA U REPUBLICI HRVATSKOJ	74
8.1	Sastavnice mjeriteljskog sustava Republike Hrvatske.....	74
8.1.1	Državni zavod za mjeriteljstvo.....	74
8.1.2	Laboratoriji nositelji državnih etalona	75
8.1.3	Hrvatska akreditacijska agencije (HAA)	75
8.1.4	Hrvatski zavod za norme (HZN).....	75
8.1.5	Ostali.....	76
8.1.6	Hrvatski mjeriteljski institut (HMI) [21]	77
8.2	Realizacija osnovnih SI jedinica u Republici Hrvatskoj.....	79
8.2.1	Realizacija definicije metra.....	79
8.2.2	Realizacija definicije kilograma	85
8.2.3	Realizacija definicije sekunde [24]	87
8.2.4	Realizacija definicije kelvina [25].....	88
8.2.5	Realizacija definicije ampera.....	90
9	ZAKLJUČAK	93
10	LITERATURA	94

POPIS SLIKA

Slika 2.1 - Egipatski kraljevski lakat.....	12
Slika 2.2 – Kamen koji je predstavljao rimsku milju	13
Slika 2.3 – Stup viteza Orlanda u Dubrovniku	15
Slika 2.4 – Mjedeni jard pohranjen u muzeju u SAD.....	16
Slika 3.1 - Ponavljajući krug u presjeku	21
Slika 3.2.....	23
Slika 3.3.....	23
Slika 3.4.....	24
Slika 3.5.....	24
Slika 3.6.....	24
Slika 3.7 – Sjeverni dio trianguliranog teritorija	25
Slika 3.8 - Triangulacija	26
Slika 3.9 – Članovi desetog zasjedanja Međunarodnog ureda za mjere i utege.....	31
Slika 4.1 – H-profil Henria Tresce.....	32
Slika 4.2 – Poprečni presjek pramjere metra	34
Slika 5.1 – Lampa kriptona 86	37
Slika 5.2 - Pojednostavljeni prikaz Michelsonovog interferometra	40
Slika 5.3 – Linije (pruge) interferencije.....	41
Slika 5.4 – Jedan potpuni prijelaz iz konstruktivne u destruktivnu interferenciju.....	42
Slika 6.1 – Tijek energije u He-Ne laseru.....	46
Slika 6.2 – Vrste rezonatora u He-Ne laserima.....	47
Slika 6.3 – Transverzalni (TEM) modovi lasera	49
Slika 6.4 – Dopplerova proširena krivulja pojačanja	50
Slika 6.5 – Radna karakteristika He-Ne lasera	51
Slika 6.6 – Shematski prikaz jedno stabiliziranog He-Ne lasera	51
Slika 6.7 – Odnos između izlaza lasera I i razmaka zrcala L	52
Slika 6.8 – Shematski prikaz stabilizacije He-Ne lasera	53
Slika 6.9 – Signal trećeg harmonika joda.....	54
Slika 7.1 – Usporedba dimenzija jednostavnom mjerkom	55
Slika 7.2 – Hijerarhija sljedivosti industrijskih mjerki	56
Slika 7.3 – Spojeni etaloni duljine	58
Slika 7.4 – „Hoke blocks“	58
Slika 7.5 – Linije interferencije kod mjerenja ravnosti etalona	62

Slika 7.6 – Linije interferencije kod mjerenja paralelnosti etalona.....	63
Slika 7.7 – Mjerenje odstupanja od paralelnosti elektromehaničkim komparatorom.....	64
Slika 7.8 – Pozicije mjerenja komparatorom.....	64
Slika 7.9 - Dijagram ovisnosti koeficijenta α čelika za izradu etalona i apsolutne temperature	65
Slika 7.10 – Duljina etalona	66
Slika 7.11 – Refleksija svjetlosti s površine etalona i podloge	67
Slika 7.12 – Duljina etalona opisana kao broj linija interferencije	68
Slika 7.13 – Vrijednosti a i b prilikom „brojanja“ linija interferencije	68
Slika 7.14 – Piramida sljedivosti	72
Slika 8.1 – Ustroj HMI-a.....	78
Slika 8.2 – Ovisnost SI jedinica	79
Slika 8.3 – Interferometar u LPCM	80
Slika 8.4 – Računalni prikaz mjerenja pruga interferencije u LPCM	80
Slika 8.5 – Unutrašnjost interferometra pri apsolutnom umjeravanju planparalelnih graničnih mjerki	81
Slika 8.6 – Certifikat kalibracije lasera LPCM	82
Slika 8.7 – Certifikat primarnog etalona lasera LPCM 1/2	83
Slika 8.8 - Certifikat primarnog etalona lasera LPCM 2/2	84
Slika 8.9 – Nacionalni etalon kilograma Republike Hrvatske	85
Slika 8.10 – Oscilloquartz SA 3200	87
Slika 8.11 – Sljedivost u sustavu realizacije definicije sekunde RH.....	88
Slika 8.12 – Sljedivost u Primarnom elektromagnetskom laboratoriju	91
Slika 8.13 – Josephsonov etalona napona pri PEL	92
Slika 8.14 - Leeds & Northrup 4040B	92

POPIS TABLICA

Tablica 2.1 - Podjela mjernih jedinica u starom Egiptu	11
Tablica 5.1	38
Tablica 6.1 – Preporučene valne duljine zračenja za realizaciju metra [1].....	44
Tablica 7.1 – Razredi tolerancija ISO 3650:1998	59
Tablica 7.2 – Primjer mjerne nesigurnosti mjerenja interferometrom.....	71
Tablica 8.1 – Nositelji nacionalnih etalona u Republici Hrvatskoj	76
Tablica 8.2 – Etaloni kilograma pri Laboratoriju za masu i gustoću (HMI) [23]	85
Tablica 8.3 – Mjeriteljska oprema za realizaciju definicije kilograma [23]	86
Tablica 8.4 – Glavni dijelovi postojećeg etalona temperature	89
Tablica 8.5 – Mjeriteljske sposobnosti etalona	90

1 UVOD

Mjerenje duljine i dostupnost standarda duljine su od ključnog značaja za postojanje i razvoj modernog i tehnički razvijenog društva. Kroz trgovinu i industriju pojavila se potreba za mogućnosti mjerenja duljine pri zahtijevanoj točnosti i iskazanoj u univerzalno prihvaćenoj mjernoj jedinici. Prethodno korištene mjerne jedinice iskazane kroz prosječnu duljinu dijelova čovjekovog tijela (palac, lakat i dr.) jednostavno nisu bile dovoljno točne, niti pogodne za veće udaljenosti. Kako je društvo postajalo složenije i razvijenije, povećavala se potreba za što točnijim načinom mjerenja.

Od 19. stoljeća i potpisivanja Konvencije o metru, pa do danas, čovječanstvo teži što točnijoj definiciji duljine, odnosno metra. Za povećanje točnosti nužno je bilo kontinuirano unapređivati metode mjerenja, ali i ulagati u inovacije na tom polju.

Ta težnja je kao rezultat donijela otvaranje posve novih polja znanosti i tehnologije, poput nanotehnologije. Razvijanje tehnologije izravno utječe i na poboljšanje općenite kvalitete življenja, pa je čovjek u 150 godina došao od parnog stroja do čipova veličine kovanica od kojih svaki sadrži po 2 milijarde poluvodičkih elemenata. Bez metra i mjeriteljstva to ne bi bilo moguće, pa se mjeriteljstvo može promatrati i kao sučelje između znanosti i tehnologije koje im omogućava stalan i nezadrživ razvoj.

2 RAZVOJ MJERITELJSTVA DO 18. STOLJEĆA

2.1 Egipat

Mnoge civilizacije su imale potrebu za mjernim jedinicama realiziranim kroz dijelove tijela, biljke ili slično. Egipatski lakat se smatra najčešće korištenom mjerom za duljinu Staroga vijeka. Smatra se da je definiran oko 3000 godina pr. Kr. i da je bio temeljen na kraljevskom glavnom etalonu lakta od crnog granita, pomoću kojeg su Egipćani u redovitim intervalima umjeravali ostale mjerne uređaje toga doba – ravnala i štapove. Kraljevski lakat je iznosio 524 mm, i bilo ga je moguće podijeliti na manje dijelove. Podjela je bila izuzetno komplicirana [4].

Tablica 2.1 - Podjela mjernih jedinica u starom Egiptu

Kraljevski lakat	28 prstiju / 7 dlanova	524 mm
Mali lakat	24 prstiju / 6 dlanova	449,04 mm
T'ser	16 prstiju / 4 dlana	299,36 mm
Veliki raspon	14 prstiju	261,94 mm
Mali raspon	12 prstiju / 3 dlana	224,52 mm
Ruka	5 prstiju	93,55 mm
Dlan	4 prsta	74,86 mm
Prst		18,71 mm

Podjela se možda čini čudnom, ali je funkcionirala. Velika piramida Gize je tome dokaz, jer iako se pretpostavlja da ju je gradilo preko 1000 ljudi, njezine stranice ne odstupaju više od 0,05 posto ukupne duljine od 230 364 metra. Iz toga se može zaključiti da su izvorne dimenzije baze piramide bile 440 x 440 kraljevskih lakata.

Smatra se da su Egipćani razvili mjerni sustav duljine vrlo rano jer im je bio od iznimne pomoći u području oko rijeke Nila koja je poznata po poplavama. Bilo im je važno napraviti dobre geodetske izmjere, jer su morali znati gdje postaviti granice poslije povlačenja vode s poplavljenih područja.



Slika 2.1 - Egipatski kraljevski lakat

2.2 Babilon

Jedna od najstarijih pronađenih mjera mase je babilonska mjera za uteg koja se zvala mina. Pronađena je u više oblika, tako da u jednom obliku ima masu 640 grama, u drugome 978 grama, a pronađena je i u obliku patke (masa od 5 mina) i labuda (masa od 30 mina). Biblijski poznati shekel, koji je bio hebrejski novac, je zapravo posuđen od Babilonaca. Shekel nije jedina stvar koju su ostali narodi posudili od njih. Većina mjera i utega Babilona se kroz trgovinu proširila na srednji istok [4].

Osnovna babilonska jedinica duljine je bila kus (530 mm), koja se negdje zvala i babilonskim laktom. Tek se minimalno razlikovao od egipatskog kraljevskog lakta. Babilonska stopa je iznosila $\frac{2}{3}$ kusa. Narod je imao i pramjeru duljine koja je bila bakreni štap duljine 1103,5 mm i mase 41,5 kg, a procjenjuje se da je bila napravljena 2000 godina prije Krista [2].

Babilonci su imali i mjeru za volumen nazvanu qa. Ona je bila definirana kao volumen kocke koja je imala stranice duljine jedne širine ruke. Kocka je morala moći sadržati vodu mase 1 velike mine.

Ostali narodi srednjeg istoka toga doba (Asirci, Feničani i Hebreji) su izveli svoje sustave mjera uglavnom iz sustava Babilona i Egipta. Hebrejske mjere su bile većinom temeljene na odnosu između mine, talenta (koji je bio osnovna jedinica) i shekela.

2.3 Grčka i Rimsko carstvo

Nakon Babilona i Egipta, najnaprednije civilizacije koje su potom vladale (u prvom tisućljeću prije Krista) bile su Grčka i Rimsko carstvo. Grci su uglavnom većinu mjernih jedinica preuzeli od Egipćana, pa je tako podudarnost i u mjernoj jedinici jednog prsta (19,3 mm). 24 prsta su kao i kod Egipćana bili jednaki jednom (ovdje olimpijskom, a ne

kraljevskom) laktu. Grci su imali i mjernu jedinicu za obujam koju su zvali metrete, a iznosila je 39,4 litara.

Osnovna mjerna jedinica duljine za Rimljane je bila stopa koja bila podijeljena na 16 prstiju, ili 12 inča. Smatra se da je prst (digitus) iznosio 18,5mm; a inč (uncia) 24,67mm. 5 rimskih stopa je iznosilo 1 korak. Ove mjerne jedinice su bile za njih važne jer su u svojim mnogobrojnim marševima određivali udaljenosti uglavnom brojanjem koraka [2].

Od većih mjernih jedinica duljine poznati su stadion, milja i morska milja. Stadion je iznosio 625 stopa ili 125 koraka. Milja je iznosila 5000 stopa ili 8 stadiona; a morska milja je imala 7500 stopa ili 1500 koraka.

Rimljani su bili poznati kao veliki graditelji cesta koje su im bile od iznimne važnosti s obzirom da je Rimsko carstvo bilo tada veliko prostranstvo. Na ceste su ponekad stavljali znakove koji su označavali prijeđene milje jer tada nije bilo neobično za jednu legiju da tijekom jednog dana prijeđe ponekad i samo 5 milja. Jedan kamen koji je označavao milju je prikazan na slici 2.2.



Slika 2.2 – Kamen koji je predstavljao rimsku milju

2.4 Kina

Kina je bila stoljećima skoro potpuno izolirana od zapadnog svijeta gdje su se događale goleme promjene u mjeriteljstvu. Međutim, i kod Kineskog naroda su nađeni tragovi mjeriteljskog sustava koji upućuju na to da su razmišljali istom logikom kao i njihovi zapadni suvremenjaci.

Problem kod Kine je bio što je bila često razjedinjena i u građanskim ratovima. To je dovelo do toga da mjere duljine izuzetno odstupaju. Poznat je mou, mjerna jedinica za mjerenje zemljišta koja je varirala čak od 0,08 do 0,13 hektara. Ponekad su se mjerne jedinice zvale jednako, a bile korištene za više različitih djelatnosti i svrha. Po toj kaotičnosti se Kinezi nisu razlikovali značajnije od Zapada.

Kina je bila napredna po pitanju decimalnog sustava, za kojeg se smatra da ga je uvela već u 6. stoljeću prije Krista, dok je na Zapadu to potrajalo znatno duže [4].

2.5 Srednji vijek

U srednjem vijeku nije puno napravljeno po pitanju standardizacije i unifikacije mjera. Mjere koje su se koristile u Europi bile su uglavnom izvedene ili posuđene iz mjernih sustava Grčke, Rimskog carstva, Egipta te Babilona [2].

Najgore od svega je bilo to što su unutar države često svaka regija, pa i svaki grad imali svoje posebne mjerne jedinice. Kod nas je primjer toga bio Dubrovnik, gdje je poznata mjerna jedinica Orlandov lakat od 51 cm koji se mjeri prema laktu na Stupu viteza Orlanda. Etalon (metalni štap) čuvao se u palači Sponza, a ista duljina lakta urezana je i u kamenom postamentu Orlandova spomenika [2].

Prvi pokušaji unifikacije mjera zabilježeni su u 9. stoljeću od strane cara Svetog rimskog carstva Charlemagnea. U dogovoru s arapskim vladarima i trgovcima, postavio je mjernu jedinicu duljine temeljenu na arapskom laktu. Iznosila je 649 mm, i zadržala se u upotrebi sve do 1795. [5].

U 12. i 13. stoljeću javili su se čvrsti pokušaji, pa i uspjesi u unifikaciji mjera duljine pri trgovanju vunom. Mjera je bila prihvaćena od većine gradova Europe koji su trgovali vunom, a originalna mjera je bila u posjedu Čuvara sajma u pokrajini Champagne. Iznosila je 2 stope i 6 inča, a nazvana je „ell“. Takvih pokušaja je bilo na stotine, ali nisu bili univerzalni već su se razvijale mjerne jedinice za specifične potrebe raznih grana industrije ili trgovine.



Slika 2.3 – Stup viteza Orlanda u Dubrovniku

2.5.1 Engleska

Sve do 1215. godine i Magna Carte koja je uvelike reformirala život u Engleskoj prisilivši tadašnjeg kralja da prizna određene građanske slobode, vještiji dio stanovništva je zlorabio tadašnje mjere za masu žita i vina. Odlučeno je da se tome mora stati na kraj jer šteti trgovini i građanima, pa su u Magna Cartu ugradili i dio kojim se zahtijevala jedinstvena mjerna jedinica za masu tih namirnica. To je bio početak razvitka sustava mjera i utega u Engleskoj.

Nekoliko godina nakon Magna Carte, izdana je kraljevska odredba nazvana Uredbom za utege i mjere. U njoj se prvi puta definiralo mjerne jedinice koje su u upotrebi na služben ili neslužben način već stoljećima.

Standardni jard („čelični jard našega Gospodina Kralja“) je iznosio 3 stope. Stopa je bila podijeljena na 12 inča, a inč je dodatno podijeljen na duljinu od 3 zrna ječma. Definirane su i mnoge druge mjerne jedinice poput manje poznatog štapa, i puno poznatijeg „jutra“

koje je bilo mjera za površinu zemljišta. Jedno jutro je bilo široko 4 štapa i dugačko 40 štapova. Štapom se smatrala duljina od 16,5 stopa.

Daljnji razvoj mjernog sustava je stao i u 15. i 16. stoljeću je došlo samo do periodičkih ponovnih izdavanja mjernih normi, ali se ništa značajnije nije postiglo.

U 17. stoljeću, 1690. godine Isaac Newton je predstavio svoju novu ideju (Newtonovi kolobari) o prirodi svjetlosti. Promatrajući dugine boje koje su okruživale dodirnu točku između konveksne površine stakla i ravne staklene ploče, u stvari je otkrio vrlo preciznu metodu mjerenja koja je kasnije postala temelj novoj grani znanosti nazvanoj interferencija svjetlosti [2].

U 19. stoljeću se Aktom o utezima i mjerama išlo ka boljem definiranju galona i jarda.

Jard je 1878. definiran kao:

„...ravna linija ili udaljenost između središta dvije zlatne poluge ili zuba na brončanoj poluzi...mjerenoj kada Fahrenheitov termometar pokazuje 62 stupnja, i kada je poluga poduprijeta brončanim valjcima na način da se izbjegne savijanje“.

2.6 Sjedinjene Američke Države

Sjedinjene Američke Države su, kao i sve engleske kolonije, imale engleski sustav mjera. Mnogi državnici, uključujući Georgea Washingtona i Thomasa Jeffersona, su bili za uvođenje unificiranog sustava mjera.

1821. godine je državni tajnik John Quincy Adams u svom poznatom izvješću kongresu napisao:

„Metrički sustav je neupitno vrijedan prihvatanja.“,

ali je istaknuo da ga je tada bilo nemoguće dovoljno popularizirati kako bi ga narod i državnici prihvatili. Na kraju su umjesto prihvatanja metričkog sustava, Amerikanci dodatno pokušali svoje mjerne jedinice uskladiti s engleskima [4].



Slika 2.4 – Mjedeni jard pohranjen u muzeju u SAD

Za prividnu uniformnost u mjernom sustavu je zaslužan Ured za utege i mjere (kasnije Nacionalni institut za standarde i tehnologiju) koji je to postigao organiziranjem brojnih mjeriteljskih konferencija gdje se države poticalo na jedinstveni sustav.

3 PUT DO PRVE DEFINICIJE METRA

U Europi prije Francuske revolucije tamošnji se mjerni sustav, kao i u većini Europskih zemalja, sastojao od utega i mjera koji su bili naslijeđeni još od doba Rimskog Carstva. Javljale su se, na prvi pogled istoimene mjerne jedinice, ali različite ovisno o kojoj je zemlji bilo riječ. U Velikoj Britaniji je čak većina standarda bila čvrsto donesena još u 14. stoljeću, dok je u Francuskoj bila puno veća varijacija standarda. Cjelokupna situacija je značila kaos za međunarodnu trgovinu. Metričkim sustavom su sve mjerne jedinice mogle biti podijeljene decimalno, ali važno je napomenuti da je to postalo moguće tek u kasnom srednjem vijeku kad se uklonila posljednja prepreka, a to je bio način na koji su se pisali brojevi. Do tada su bili korišteni arapski brojevi koji su svoje podrijetlo vukli vjerojatno još iz Indije i nisu imali decimalne podjele.

Za razvoj decimalnog sustava je zaslužan Flemski matematičar Simon Stevin svojim radom "De Thiende", 1585. godine. Osim što je u knjizi pokazao kako razlomke prikazati kao decimalne brojeve, zalagao se za upotrebu decimalne podjele mase, duljine i valute.

Konkretan prijedlog decimalnog mjernog sustava je došao 1670. od strane Francuza Gabriela Moutona, koji je bio župnik u francuskom gradu Lyonu. S obzirom da je bio dobar poznavatelj astronomije i matematike, predložio je mjernu jedinicu za duljinu koju je povezao s opsegom Zemlje. Nazvao ju je "mille", a označavala je šezdesetinu geometrijskog stupnja, odnosno minutu - što je odgovaralo 2,04 metra. Predvidio je da ju je moguće podijeliti na desetinke, stotinke itd. Jedna tisućinka mille je nazvana "geometrijskom stopom". Predložio je da u Lyonu bude postavljeno matematičko njihalo $1/10$ te duljine koje bi mijenjalo smjer 3959,2 puta u 30 minuta, te bi njegova duljina definirala predloženu mjernu jedinicu. Prema današnjim mjerama, 1 mille odgovara jednoj nautičkoj milji [8].

Moutonov rad je tada već postao poznat i u Parizu i zapazio ga Jean Picard. On je bio astronom u pariškoj zvjezdarnici koji je predložio da duljina njihala koje otkucava sekunde postane mjerna jedinica duljine, ali nije bio pobornik decimalne podjele. Predložena mjerna jedinica je nazvana sekundom njihala. Jedna sekunda je potpuni pomak u jednom, a druga sekunda je potpuni pomak u drugom smjeru. Period je točno 2 sekunde, a frekvencija 0,5 Hz. Pri standardnoj gravitaciji, duljina njihala L je 0,994 m što se može izračunati iz jednostavne jednadžbe matematičkog njihala:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

Gdje su:

T - period (2 sekunde)

π - konstanta

L - tražena duljina

g - konstanta

Već tada se pretpostavljalo da Zemlja nije savršena kugla, te da bi ovisno o tome gdje se mjeritelj nalazi, duljina mjerena njihalom mogla odstupati. U to vrijeme, takva pretpostavka je dodatno zakočila prihvaćanje metričkog sustava razvijanog u Francuskoj.

3.1 Mjerenje meridijana

O Moutonovom radu se daljnjih godina pričalo i raspravljalo, ali nije postojala politička klima koja bi omogućila toliki val promjena koje bi predloženi sustav izazvao.

Krajem 18. stoljeća, nakon pada Bastille i početka Francuske revolucije, Pariška akademija znanosti se načelno složila s teorijom mjerenja matematičkim njihalom. Ubrzo se neočekivano potpuno predomisli i izabrala peteročlanu komisiju koja je provjerila predloženu mjeru duljine, te je bez ikakvih objašnjenja u potpunosti odbacila.

Odlučeno je da će se mjerna jedinica duljine definirati kao deset milijunti dio Zemljinog kvadranta, odnosno dijela meridijana od Sjevernog pola do Ekvatora; te da će se moći izraziti u decimalnim podjelama. Mjerenje je moralo biti obavljeno na razini mora, a francuski akademici su istaknuli da Pariški meridijan prolazi skoro točno kroz grad Dunkirk na sjevernoj obali Francuske i kroz španjolski grad Barcelonu. Oba grada su na razini mora, a razlikuju se u zemljopisnoj širini 9 stupnjeva i 40 minuta, što je nešto više nego desetina kvadranta. Tako da je bilo odlučeno da će mjeriti Pariški meridijan.

Zemljopisne širine su mogli utvrditi astronomi s tada najboljim mjernim uređajima, a linearna udaljenost se trebala izmjeriti već poznatom metodom triangulacije. Nakon obavljenih mjerenja, ukupna duljina kvadranta se tada mogla izračunati i u konačnici se kao rezultat mogla izraziti nova mjerna jedinica duljine.

Mjerenja meridijana dijelom kojim prolazi kroz Francusku su bila značajno lakša nego što je to bilo s dijelom koji prolazi teritorijem Španjolske. Razlog tomu je bilo, osim činjenica da je teren nešto povoljniji, i mjerenje meridijana koje je djelomično već bilo obavljeno sredinom 18. stoljeća. Međutim, od tada su mjerni uređaji napredovali i bilo je moguće izvršiti mnogo točnija mjerenja [8].

Od ključnog značaja za uspjeh misije mjerenja meridijana je bio novi mjerni uređaj koji je izumio Étienne Lenoir, tada najbolji francuski proizvođač mjernih uređaja.

3.1.1 Ličnosti zaslužne za razvoj novog mjernog uređaja

Uređaj je baziran na ideji ponavljanja mjerenja koja korijene vuče još iz 1752. i rada njemačkog astronoma Tobiea Mayera [7].

Lenoir je napravio prvi primjerak 1784. godine uz konstantno nadgledanje i mentorstvo Jeana Charlesa Borde, koji je bio kapetan francuske mornarice i vodeći eksperimentalni fizičar. Borda je dodatno razvio Mayerovu metodu ponavljanja mjerenja i zaposlio Lenoira da ju realizira i usavrši.

Zanimljivo je da je Borda angažirao Lenoira 1772. godine dok je on imao 30 godina i bio praktički nepismen. Lenoir je radio u Parizu kod proizvođača mjerne opreme za matematičare. Usporedno je pohađao besplatan tečaj matematike koji je bio dostupan za sve građane koji su se bavili zanatom. Kratko nakon toga ga je spazio Borda, dok je Lenoir izrađivao visoko kvalitetne mjerne uređaje za astronomiju koje su koristili svi tadašnji vodeći znanstvenici Pariza. Međutim, iako nije imao kvalitetno obrazovanje, Lenoir je pokazao svoju inteligenciju i osobine mehaničkog genija, te je već nakon 2 godine napravio prvi uređaj [8].

3.1.2 Novi mjerni uređaj

Novi mjerni uređaj je nazvan "ponavljajućim krugom". Ime je dobio po kružnoj ploči koja nosi dva teleskopa koji omogućuju istovremeno promatranje dvije točke između kojih se vrši mjerenje kutne udaljenosti. Nazvan je ponavljajućim iz razloga što omogućuje ponavljanje mjerenja, što mu osigurava željenu razinu točnosti ovisno o broju ponavljanja [7].

1788. uređaj je korišten prilikom mjerenja udaljenosti triangulacijom preko Doverskog prolaza u kanalu La Manche, čime su se povezale zvjezdarnice u Greenwichu i Parizu. Lenoirov ponavljajući krug se pokazao kao uređaj iznimne točnosti, čime je zasjenio već prisutni teodolit koji je bio u upotrebi u Engleskoj. Već godinu dana prije je Lenoir dobio titulu Ovlaštenog inženjera kralja Francuske. Uspjeh kod Doverskog prolaza je poslužio kao dodatna potvrda izvrsnosti, te je francuska vlada naredila Lenoiru da napravi instrumente koje će koristiti u ekspediciji mjerenja meridijana Méchain i Delambre; kao i sve ostale instrumente u francuskim geodetskim i pomorskim ekspedicijama tog vremena. Na Lenoiru nije bio lagan zadatak, jer se predviđa da je na raspolaganju imao manje od deset asistenata, a trebao je izraditi 4 uređaja koji su bili potrebni za dvije

grupe promatrača. Nakon 15 mjeseci rada, uređaji su bili gotovi, te je trebalo napraviti pomoćne naprave za mjerenja.

Lenoir je imao iskustvo s izradom paraboličnih zrcala za svjetionike, pa je od njega bilo traženo da grupama isporuči i snažne lampe, kako bi si mjeritelji mogli signalizirati prilikom noći, magle ili loših vremenskih prilika. Uz lampe, morao je i napraviti mjerne štapove, koji su bili načinjeni od platine i bakra.

S obzirom da su mjeritelji morali raditi u svim vremenskim uvjetima, koeficijent temperaturnog rastezanja mjernih štapova je igrao veliku ulogu. Borda je surađivao s čuvenim Antoineom Lavoisierom, tadašnjim blagajnikom Akademije i vodećim članom Komisije za utege i mjere, s ciljem da precizno odrede koeficijent temperaturnog rastezanja platine i bakra. Na Lavoisierovom imanju su mjerili vrlo male pomake u duljini štapova s pomoću preciznog komparatora, kojeg je također osmislio i napravio Lenoir, koji im je ujedno i pomagao pri mjerenjima.

Nakon što su mjerenja koeficijenata temperaturnog rastezanja završila, morala se osigurati zaštićenost vrlo tankih i krhkih štapova koji su bili duljine 12 stopa. Svaki štap je bio smješten u tankom utoru debele drvene daske, i prilikom upotrebe je bio pokriven drvenim krovom i tkanenim zavjesama kako bi se umanjio utjecaj sunčeve topline na eventualnu kontrakciju ili ekspanziju. Svaka daska je bila smještena na tronožac, s posebnim oprezom kako bi se osigurao ostanak u horizontalnom položaju.

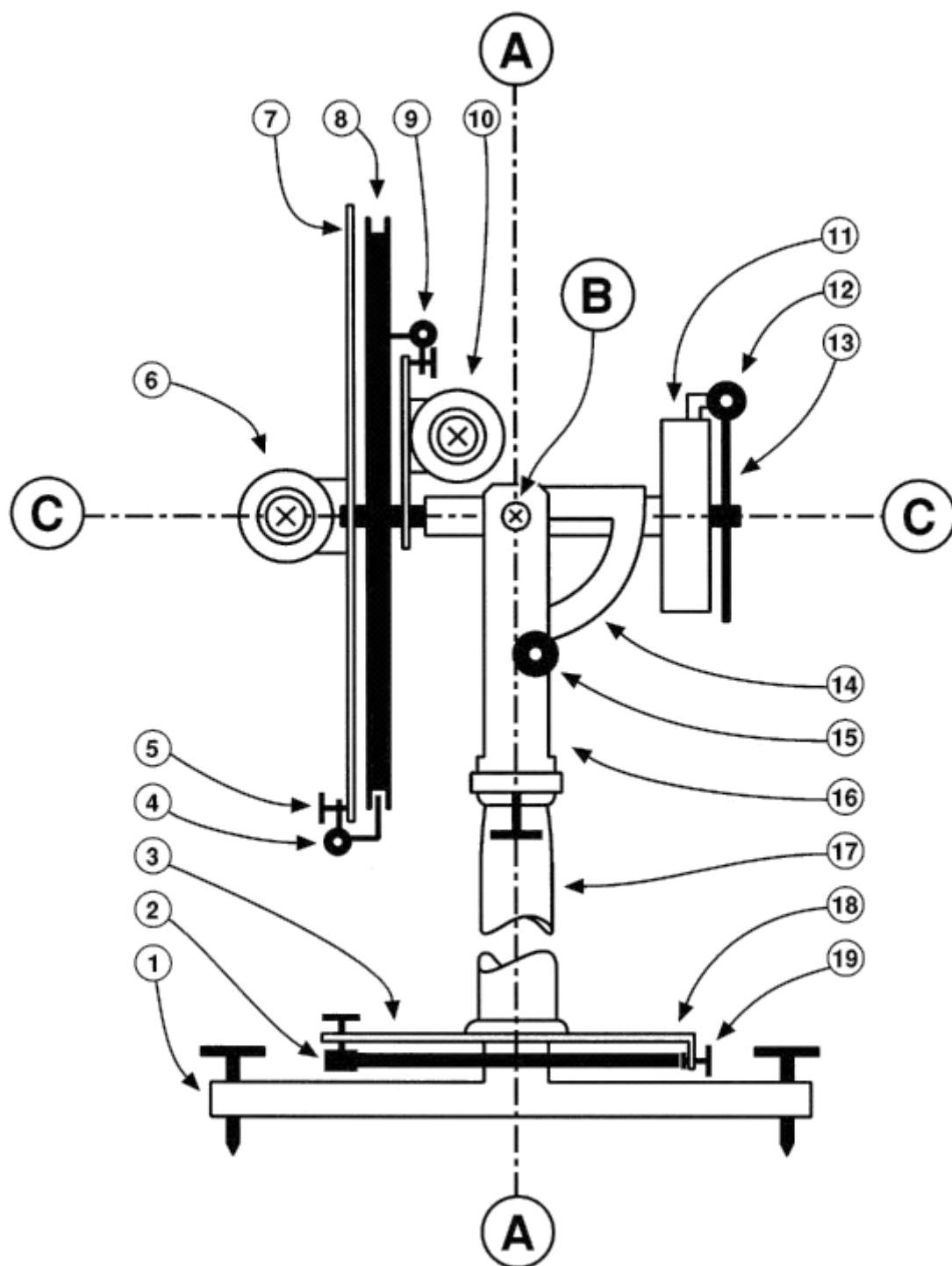
3.1.3 Način rada ponavljajućeg kruga

Lenoirov instrument se sastoji od vertikalnog stupa (17) koji se nalazi na ploči s 3 podešavajuća vijka (1). Stup, zajedno s za njega pričvršćenim elementima može rotirati oko svoje vertikalne osi (A), te biti fiksiran pomoću vijka za zaustavljanje (19).

Na svojem dnu, ima nazubljeni smjerni uređaj. Pogon je realiziran pomoću zupčanika (2) smještenog na kraj alidade (3) koja ima nonijus za očitavanje azimuta (18).

Na vrhu stupa je konzola (16) pričvršćena s dva vijka. Konzola ima zadaću nošenja horizontalne cilindrične osovine (B) koja je smještena pod pravim kutom u odnosu na još jednu, isto tako cilindričnu osovinu (C) istog promjera.

Na kraj osovine C je smještena podijeljena kružna ploča (8). S druge strane osovine C je protuuteg (11) za balansiranje osovine zbog težine kružne ploče i ostalih elemenata s druge strane. Načinjen je kao mjedeni, olovom ispunjeni bubanj [7].



Slika 3.1 - Ponavljajući krug u presjeku [7]

Osovina C može rotirati oko horizontalne osovine B, čime kružna ploča može poprimiti bilo koji nagib. Nagibom rotacije kružne ploče upravlja se malim limenim kvadrantom (14) koji može biti fiksiran pomoću zatika (15).

Teleskopi su smješteni s obje strane kružne ploče i mogu, neovisno jedan od drugoga, rotirati oko osovine C. Vanjski teleskop (6) je smješten na vanjsku stranu ploče i

prikazanom položaju presijeca os osovine C. Unutarnji teleskop (10) je na unutarnjoj strani kružne ploče i ekscentričan s obzirom na os C. Vanjski teleskop je smješten na četvrtasti mjedeni okvir (7) čije dijagonale čine dvije međusobno fiksirane alidade s nonijusima. Svaki nonijus sadrži mali mikroskop za očitavanje. Alidada (7) može biti fiksirana na kružnu ploču s zatikom (5) koji dolazi s vijkom za podešavanje (4). Unutarnji teleskop je smješten na običnu alidadu bez nonijusa koja također može biti fiksirana na kružnu ploču na isti način, zatikom s podešavajućim vijkom (9).

Mehanizam za rotaciju kružne ploče oko osovine C je riješen pomoću ravnog bubnja (13) koji na svojem obodu ima zupčani prijenos s helikoidnim ozubljenjem. Buba ima isti promjer kao i protuuteg uz koji je smješten, čime doprinosi protuteži i ne narušava dimenzije cijelog uređaja.

Prebacivanje iz točne i spore rotacije u brzu i manje točnu je riješeno tangencijalnim vijkom koji nasjeda na obod jednog od zupčanika. S posebnim ključem je moguće otpustiti oprugu koja drži vijak, te time osloboditi zupčanik i omogućiti brže pomake.

Konačno, materijali za izradu uređaja su bili drvo, čelik, slonovača, mjed i staklo. Uređaj je bio 76 cm visok, 40 cm širok, te 56 cm dugačak. Masa je bila čak 20 kg.

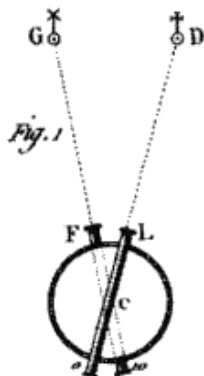
3.1.4 Značaj i način mjerenja ponavljajućim krugom

Konstrukciju ovakvog uređaja je nadahnula ideja njemačkog astronoma Tobiea Mayera. Oko 1752. godine je mjerio kutove ponavljajući svako mjerenje nekoliko puta. Krajnji rezultat je podijelio s brojem mjerenja, te je otkrio da je dobiveni rezultat daleko točniji nego da je napravio interpolaciju po mjernoj skali kruga. Dodatna prednost ovakvog mjerenja je smanjenje mjerne nesigurnosti koje su karakteristika svakog mjerenja kuta. Ovakvim mjerenjem pogreške mjernog instrumenta, ili pogreške nastale očitanjem sa skale, imaju puno manji utjecaj na krajnji rezultat.

U odnosu na teodolit, ponavljajući krug ima samo jedan krug, što znači da je nemoguće izravno mjerenje vodoravnih kutova. Prije nego što se izvrši mjerenje između dvije točke, krug se mora namjestiti paralelno s ravninom nagiba.

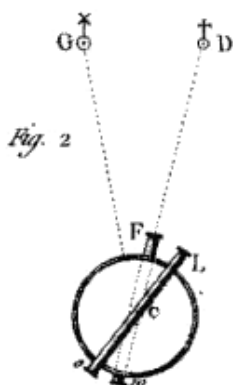
Za mjerenje kutova zenita, krug se orijentira vertikalno. Jedan od teleskopa se postavlja točno okomito na zamišljenu liniju zenita kako bi formirao referentnu liniju. Drugi teleskop se tada može uperiti na promatrano nebesko tijelo između kojeg želimo izmjeriti kut zenita.

Na slikama su označene dvije točke mjerenja, G (Gauch – franc. lijevo) i D (Droit – franc. desno). One su otprilike udaljene 10 stupnjeva. Teleskopi su označeni slovima L i F. U početku su oba teleskopa fiksirana na rotirajući krug (slika 3.2) i upereni su u točke G i D.



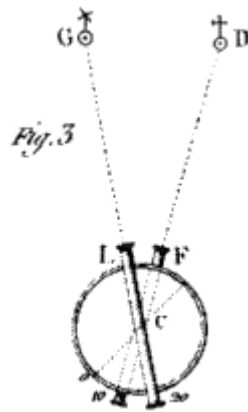
Slika 3.2

Nakon toga, teleskop F se rotira u smjeru kazaljke na satu kako bi bio uperen u točku D (slika 3.3). Istovremeno je došlo do pomaka teleskopa L.



Slika 3.3

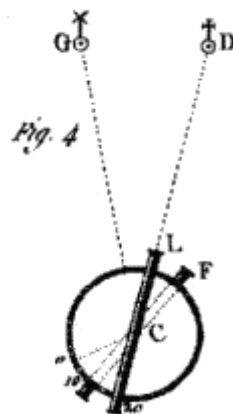
Sada teleskop L treba odvojiti od kruga i okrenuti u smjeru kazaljke na satu dok ne bude uperen u točku G (slika 3.4).



Slika 3.4

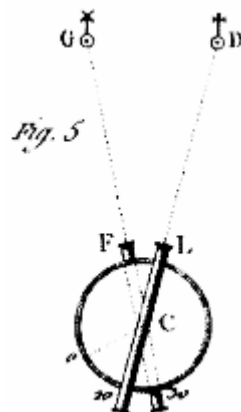
U odnosu na početnu poziciju na slici 3.2, očitani kut je sada dvostruki, odnosno 20 stupnjeva.

Prema slici 3.5, teleskop L je ponovno fiksiran na krug i uperen u točku D.



Slika 3.5

Sada se teleskop F pomaknuo, te ga na isti način kao i prije teleskop L treba odvojiti od kruga i okrenuti u smjeru kazaljke na satu dok ne bude uperen u točku G (slika 3.6).

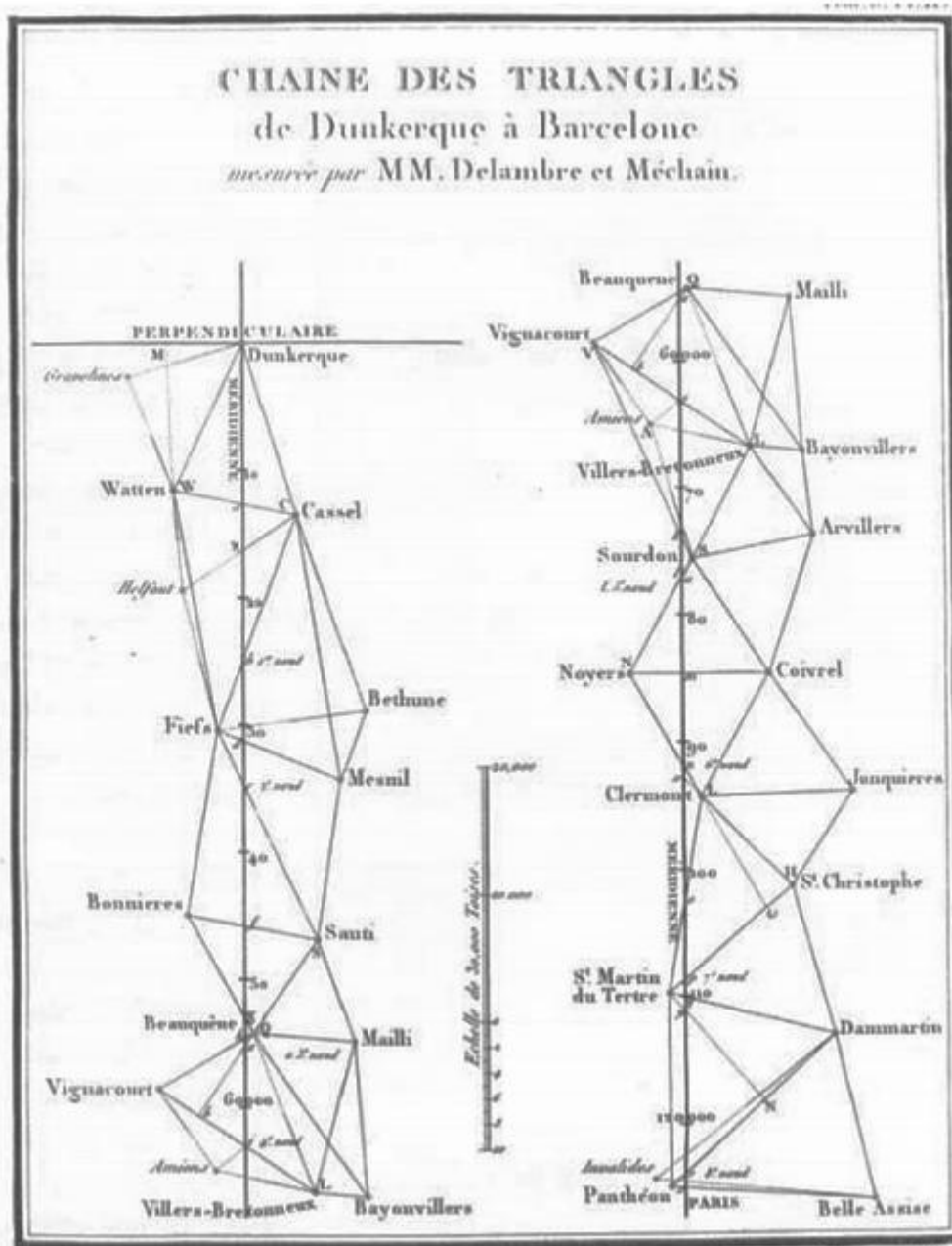


Slika 3.6

Sada je dodano još 10 stupnjeva ukupnom rezultatu mjerenja, te se mjerenje na ovaj način može ponavljati proizvoljni broj puta. Na gotovo istovjetan način se obavljalo i mjerenje kutova između zenita i nebeskih tijela.

3.2 Ekspedicija Dunkirk-Barcelona

S obzirom da se za mjerenje Pariškog meridijana koristila metoda triangulacije, to je značilo da je bilo potrebno izmjeriti više od 100 trokuta. Početne linije su bile blizu Meluna (južno od Pariza) i s druge strane u Perpignanu.



Slika 3.7 – Sjeverni dio trianguliranog teritorija [8]

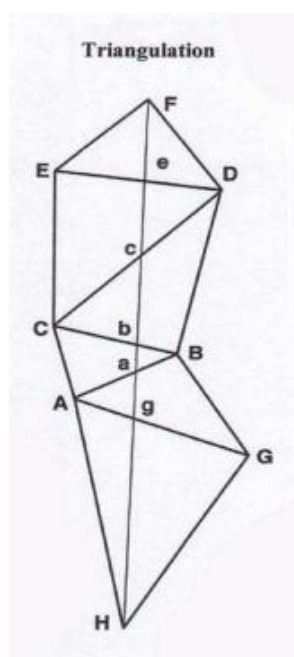
3.2.1 Triangulacija

Tehnika triangulacije je djelo nizozemskog matematičara Gemma Frisiusa iz 1533. godine koja koristi neka svojstva trokuta u svrhu izračuna udaljenosti. Triangulacija je tehnika koja se često koristi u geodeziji, ali i astronomiji, navigaciji, a koristila se i za usmjeravanje artiljerije tijekom ratova [6]. Postupak koristi zemljopisna obilježja poput vrhova planina, zvonika i sl. Ona u mreži povezanih trokuta predstavljaju njihove vrhove. Koristeći svojstva trigonometrije izračunavaju se nepoznate veličine susjednih trokuta iz dostupnih podataka kao što su kutovi i udaljenosti.

Mjerenje počinje postavljanjem prvog trokuta. Prvo se postavlja bazna linija poznate duljine mjerenjem udaljenosti između dvije točke. Mjerenjem se izvodi okretajem kotača poznatog promjera ili pomoću štapova (ili lanaca) poznate duljine.

Nakon što je bazna linija izmjerena, izabire se treća točka kojom će biti formiran trokut. S početne i krajnje točke izmjerene bazne linije se tada mjeri kut prema trećoj točki. Kada su poznati svi kutovi trokuta i duljina jedne stranice, izračunavaju se ostale udaljenosti i formira se prvi trokut. Nakon toga se sa strane poznatog trokuta konstruiraju slijedeći trokuti koji kao baznu liniju imaju već izmjerene stranice. Time se na kraju dobiva mreža trokuta poznatih dimenzija kojom se može izmjeriti velika udaljenost koristeći zapravo vrlo malene trokute.

Na kraju, luk triangulacije između dvije vrlo udaljene točke (na slici točke H i F) se izračunava tako da se za baznu liniju jedne strane izmjere zemljopisna dužina i duljina. Tada se krajnje udaljene točke spajaju mrežom susjednih trokuta čime se formiraju četverokuti. Prikaz je na slici 3.8 [6].



Slika 3.8 - Triangulacija

3.2.2 *Tijek mjerenja meridijana*

Za mjerenje sjevernog dijela za voditelja tima je izabran Jean Baptiste Joseph Delambre, geodet, astronom i matematičar. Za voditelja tima koji je bio odgovoran za dio meridijana južno od Pariza je bio izabran Pierre Francois Andre Mechain, astronom poznat po promatranju kometa i ostalih dalekih nebeskih tijela.

Mjerenje samo početnih linija je trajalo 7 tjedana, što ne začuđuje kada se uzme u obzir da je izmjerena duljina bila 72 000 stopa. Štapovi su tako morali biti pomaknuti i precizno izmjereni oko 3000 puta. Pri svakom pomicanju, par štapova je morao biti precizno poravnat, stavljen u izravan kontakt te potom izmjeren.

Gdje god je bilo moguće za kutove trokuta su bile izabrane visoke i lako uočljive točke poput crkvenih tornjeva ili vrhova planina. Sve izmjere su bile dodatno korigirane kako bi se uzela u obzir zakrivljenost Zemljine plohe, te varijacije u nadmorskoj visini.

Sjeverni dio meridijana je bio više od 2 puta duži od južnog, što je Delambre lako objasnio činjenicom da je južni teren brdovit i nepristupačan, a da je sjeverni dio uvelike i bio izmjeren 1740. kada je bilo zadnje mjerenje cijele Francuske.

Mjerenja su zahtijevala iznimno mnogo vremena, više nego što je bilo očekivano. To nije bilo ništa neobično jer je morao biti izvršen ogroman broj matematičkih operacija.

Osim silnog posla, mjeriteljima su posao otežale i političke prilike u Francuskoj. U to doba je bio pogubljen kralj Luj XVI (1793.), a Francuska je bila u ratu s većinom zemalja Europe.

Mjerenje je bilo započeto 25. lipnja 1792. Mjeritelji su svuda izazivali čuđenje zbog svojih neobičnih mjernih instrumenata, pa čak i do te mjere da su bili maltretirani i privođeni novim vlastima pod sumnjom da su špijuni svrgnute vlasti.

Odmah pri početku mjerenja Delambre je naišao na probleme kada ga je narod uhitio jer su mu svi dokumenti bili potpisani od strane svrgnutog kralja. Delambre se izvukao i spasio život tako što je narodu održao predavanje na temu metričkog sustava. U svom predavanju je objasnio značaj metričkog sustava kao također revolucionarnog sustava koji će svima olakšati svakodnevni život.

Mechain je bio uhićen već na trećoj mjernoj postaji kod Essonea zbog toga što su ga smatrali špijunom, a njegove mjerne uređaje oružjem. Naposljetku je pušten i uspio je doći do Španjolske. Kada je na kraju stigao do Barcelone, morao je tamo ostati neko vrijeme jer je Španjolska kratko bila u ratu s Francuskom (1793. do 1795.) [6]

3.2.3 Prikrivena pogreška

U Barceloni je Mechain napravio nevjerojatno pretjeran broj mjerenja jer bio zaokupljen svojom preciznošću. Pogreške je smatrao svojim osobnim neuspjehom, pa je bio šokiran kad je 1794. otkrio neke nepravilnosti u svojim rezultatima. Najviše od svega ga je mučilo to što nije uspio pronaći uzrok nepravilnostima. Pogrešku nije htio priznati, nego ju je zataškao i blago promijenio svoje rezultate mjerenja. Pretpostavlja se da je pogreška bila izazvana mehaničkim trošenjem rotirajuće osovine stupa na mjernom uređaju [7].

Mjerenje je bilo kratko obustavljeno, pa ponovno pokrenuto 1795. kada je Mechainu naređeno da sa svojim rezultatima dođe u Pariz. On je to bio odbio iz dva razloga. Prvi je bio sigurnost, jer su u to doba mnogi znanstvenici bili pogubljeni. Drugi je bio njegova pogreška i strah od suočavanja s Delambreom koji je već bio predao sve svoje podatke mjerenja.

Mechain je naposljetku došao u Pariz gdje nije htio objaviti prikupljene podatke. Uz Napoleonovo dopuštenje je krenuo proširiti svoje mjerenje do Balearskog otočja. Ubrzo nakon što je počeo s mjerenjima se razbolio i umro, ostavljajući svu odgovornost Delambreu.

Delambre je konačno dobio sve podatke, te je primijetio Mechainove pogreške. No, to nije bilo toliko tragično jer je Mechain uz svoje neupitno astronomsko umijeće promijenio rezultate na način da značajno ne utječu na točnost triangulacije. U to doba, pa sve do pojave velikih znanstvenika Laplacea, Gaussa i Legendrea nitko nije razumio točnu narav pogreške.

25 godina nakon Mechainove smrti, Laplaceov kolega profesor je primijenio novo razvijenu teoriju o pogreškama na mjerenja iz Barcelone i dokazao je da je greška u mjernom uređaju bila krivac za pogreške. Profesor je bio Joseph Nicolas Nicolle, francuski astronom, geodet i matematičar.

Otkriveno je da je Mechain u svojoj želji da bude što precizniji u svoja mjerenja uključio nebeska tijela sjeverno i južno od zenita. Delambre je promatrao dio neba samo sjeverno od zenita i time, pretpostavlja se, nije došlo do većih pogrešaka.

3.2.4 Konačna definicija metra

Krajem 18. stoljeća, 1794. iako podaci mjerenja meridijana nisu bili u potpunosti dostupni, Narodni konvent Francuske je htio uvesti novi sustav utega i mjera. Djelom su korišteni i otprije poznati podaci iz mjerenja 1740-ih godina. Nova mjerna jedinica je nazvana metrom, a ime vuče iz grčke riječi metreon – što je značilo „mjera“ [8].

Nakon kratke rasprave, odlučeno je i da će biti prihvaćeni grčki prefiksi (deca, kilo, itd.) za decimalne dijelove, te latinski prefiksi (deci, mili, itd.) za višekratnike. Te ideje je zastupao Claude Antoine Prieur, bivši inženjerski dužnosnik. Naposljetku je došlo i do dogovora o litri i gramu. Litra je definirana kao kubni decimetar, a gram je definiran kao masa kubnog centimetra vode pri njenoj najvećoj gustoći.

Lenoir je napravio provizoran metar od mjedi, te je konstruirao stroj kojim je proizveo 660 točnih replika metra za distribuciju u sve krajeve Francuske. Tiskani su i materijali koji su narodu trebali pomoći pri pretvaranju tadašnjih mjernih jedinica u metričke. Iako je od 1794. upotreba metričkog sustava postala legalna, on nije zaživio još neko vrijeme. Za odgodu primjene metričkog sustava je, između ostalog, zaslužno političko ozračje u tadašnjoj Francuskoj. Akademija znanosti je bila raspuštena, a čak 10 akademika (uz Lavoisiera) je bilo ubijeno.

Komisija za mjere i utege je završila definiranje metra 1798. kada je duljinu metra na osnovu svih dostupnih podataka definirala kao 3 stope i 11,296 linija. Metar su pokušali uvesti kao međunarodnu jedinicu, pa su na znanstvenu konferenciju bili pozvani tadašnji saveznici Francuske ili neutralne zemlje: Španjolska, Danska, Nizozemska, Švicarska te neke države Italije. Mnogo ostalih zemalja nije došlo zbog tadašnje ratne politike Napoleona, ali unatoč tome upravo je ta konferencija poznata kao prva međunarodna znanstvena konferencija.

Lenoir je napravio konačni metar od platine, a Nicolas Fortin je napravio konačnu mjeru za kilogram također od platine. Oboje su bili veliki izumitelji i vrhunski zanatlije. 22. lipnja 1799. definitivni standardi metričkog sustava, platinski metar i platinski kilogram, ceremonijalno su pohranjeni u arhiv Francuske Republike, te se stoga nazivaju arhivski metar i arhivski kilogram. Lenoir i Fortin su pozvani na svečanu ceremoniju kojom su mjere duljine i mase bili pohranjene u državni arhiv, a tim pozivom im je na neki način znanost odala počast za sav doprinos, što do tada nije bila praksa u znanstvenim krugovima.

10. prosinca 1799., donijet je zakon koji je potvrdio njihov status kao jedinih legalnih mjera za mjerenje duljine i mase u Francuskoj, ali njihova upotreba nije bila obavezna.

3.3 Prihvaćanje metričkog mjernog sustava

Predstavnici ostalih zemalja su u svoje zemlje odnijeli iz Francuske točne replike metra, ali prihvaćanje nije prošlo onako kako su se u Francuzi nadali. Smatra se da su mnogi znanstvenici diljem Europe dijelili mišljenje Charlesa Blagdena koji je još 1791. izrazio svoju zabrinutost novom mjernom jedinicom jer su prema njegovim tvrdnjama Francuzi

htjeli podvaliti Europi i svijetu baš svoje mjere meridijana kao univerzalne, a da se praktički nikoga nije ništa pitalo [8].

Čak i u Francuskoj metar nije još dugo zaživio. Iako je Državni institut (nasljednik Akademije znanosti) u znanstvenim radovima zabranio upotrebu bilo kojih drugih mjernih jedinica za duljinu osim metra, došlo je do otpora ponajviše u trgovini, te su stare mjerne jedinice i dalje bile u upotrebi.

1812. je Napoleonova vlada napravila korak unatrag i legalizirala sustav koji je nudio kompromis između metričkog i starog sustava. Tako je definirana obična stopa (kao trećina metra) i obična funta (kao pola kilograma). Ovakav sustav je dodatno zakomplicirao stvari i zbunio narod jer su tada uz stare stope i funte imali i nove. Tek 1840. je metrički sustav konačno postao jedini mjerni sustav u Francuskoj i njegovo korištenje je postalo obavezno.

1856. je prvi Lenoirov štap uspoređen s štapom koji je napravljen za španjolske kartografe, a od tada se čuva zajedno s ostalim štapovima u pariškoj zvjezdarnici nakon što su dodatna mjerenja meridijana bila završena do Škotske na sjeveru i do Balearskog otočja na jugu.

Prve zemlje u svijetu u kojima je upotreba metričkog sustava bila obavezna su bile Belgija i Luksemburg 1820. godine [2].

S porastom svjetske trgovine i sve bržim razvojem znanosti rastao je i interes za sustav metričkih jedinica. 1867. je u Parizu održana međunarodna izložba na kojoj su delegati raznih zemalja snažno zagovarali prihvaćanje metričkog sustava. Kasnije su sličan prijedlog dale Akademija znanosti St. Peterburga i Međunarodno društvo za geodeziju, pa je francuska Vlada sponzorirala osnivanje Međunarodne komisije za metar. Ona je imala za zadaću osnivanje znanstvene ustanove koja je trebala s tada najboljim dostupnim mjernim uređajima konstruirati i odobriti nove međunarodne pramjere metra i kilograma. 1872. godine formulirana su detaljna pravila za konstrukciju metričkih pramjera i Međunarodnog ureda za mjere i utege. Taj ured je imao zadaću čuvanja metričkih pramjera i širenje metričkog sustava jedinica u svijetu. 1875. godine je Francuska sazvala diplomatsku konferenciju na temu metra, pa je iste godine 20. lipnja potpisana Konvencija o metru. Konvenciju je u Parizu potpisalo 18 država, a jedna od odluka je bila da Pariški meridijan neće biti ponovno mjeren [9].

U Austro-Ugarskoj, pa i u Hrvatskoj, metričke jedinice postaju obavezne od siječnja 1876. godine [2].

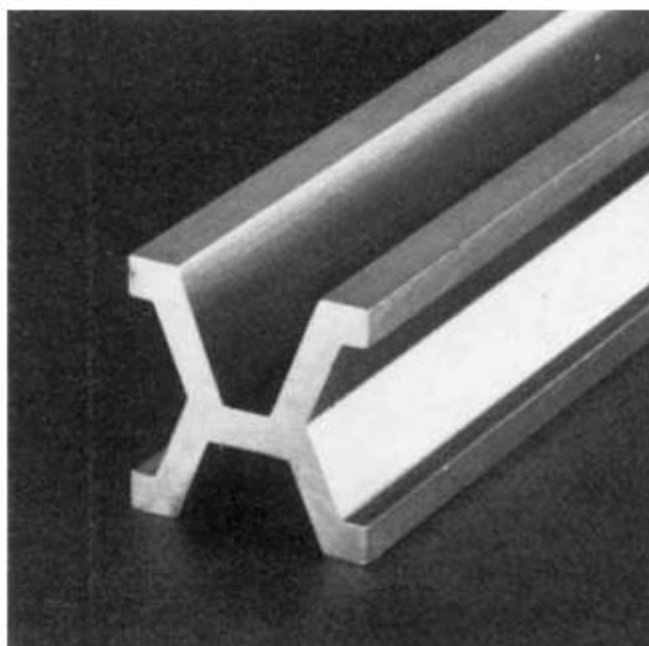


Slika 3.9 – Članovi desetog zasjedanja Međunarodnog ureda za mjere i utege

Na slici s lijeva prema desno: B.-A. Gould, H.-J. Chaney, A. Arndtsen, R. Thalén (straga), H. Wild (naprijed), W. Foerster (predsjednik), A. Hirsch (tajnik), J.-R. Benoît (Direktor BIPM-a, straga), J. Bertrand, L. de Bodola, H. de Macedo, St.-C. Hepites

4 PRAMJERA METRA

Na Međunarodnoj komisiji za metar 1872. odlučeno je da će pramjera metra biti legura od 90% platine i 10% iridija, te da će metar biti definiran na način da se mjeri udaljenost između središta dvije ugravirane linije. Pramjera je bila H poprečnog presjeka kako bi imala najveću moguću krutost za upotrijebljenu količinu materijala. H-presjek je omogućio definiranje i smještanje linija na način da imaju maksimalnu zaštićenost od eventualnih oštećenja. Osmislio ju je Henri Tresca koji je bio proslavljeni francuski inženjer i profesor na Nacionalnom Konzervatoriju Umjetnosti i Zanata u Parizu, poznat po svojoj teoriji plastičnosti.



Slika 4.1 – H-profil Henria Tresce [9]

Izradu pramjere je sponzorirala francuska Vlada u ime francuskog predstavništva u Međunarodnoj komisiji za metar. S obzirom da do tada nikad nisu proizvedeni komadi čiste platine i čistog iridija, u izradu pramjera se išlo vrlo oprezno. Najveći odljevak platine do tada je bio Georga Mattheya 1862. i bio je mase 100 kg. Međutim, tada je bio potreban odljevak od 250 kg i to je zahtijevalo pomoć francuskih stručnjaka Henria Sainte-Claire Devillea i J.Henri Debraya koji su već imali iskustva s rafiniranjem i taljenjem platine. Potreban materijal je bio ruskog podrijetla i dobio ga je Matthey.

Legiranje je izvršeno u 3 komada (80, 85 i 90 kg), te su ingoti tada bili odrezani na komade mase 2 kg. 1874. su na Nacionalnom Konzervatoriju Umjetnosti i Zanata sve komade ponovno rastalili u jedan veliki ingot. Nakon čišćenja, ingot je bio mase 236 kg i mogli su pristupiti njegovom rezanju na komade koji su poslije bili podvrgnuti obradi deformiranjem materijala, točnije - hladnom izvlačenju. Tom obradom je ingot poprimio

poprečni presjek u obliku slova H ali je zbog određenih problema pri obradi i pucanja materijala na kraju iskorišteno samo njegovih 27 metara, odnosno 90 kg. Nažalost poslije je otkriveno da je i u tih 90 kg ispravno materijala bilo prisutno podosta pukotina, kao i da gustoća materijala nije bila po planu (zbog pronađenih tragova željeza i rutenija). Bez obzira na sve to, komisija je bila zadovoljna rezultatima [9].

1877. se dogodio šok za Henria Trescu, jer je komisija odlučila odbaciti njegove poluge H-profila. Takva odluka je donesena zahvaljujući tome što je Matthey izrazio zabrinutost time što je u konačnoj leguri pronađeno dosta željeza koje je prema njegovim procjenama tamo dospjelo prilikom obrade hladnim izvlačenjem.

Sukladno tome, je 1878. Međunarodna komisija za metar zatražila od Mattheya da proizvede dvije četvrtaste poluge od nove legure. Matthey je tada ima puno više iskustva i znanja o legurama iridija i platine od bilo koga drugoga te je odljevke napravio u Londonu. Nije koristio hladno izvlačenje u više faza kao Tresca, već je odljevke prvo blanjavao a tek kao završnu obradu koristio hladno izvlačenje. Rezultat njegovog rada su bile poluge sa samo 0,23% nečistoća i većom gustoćom od Trescinih.

Nakon što je Komisija vidjela rezultate, zahtijevali su da se poluga H-profila napravi na isti način kao i Mattheyeve četvrtaste poluge. Matthey ih je isporučio 1879., a zanimljivo je da je zbog toga što je koristio blanjanje, samo za tu obradu bilo potrebno 448 sati rada [9].

Skoro svaka država potpisnica Konvencije o metru je zahtijevala svoj primjerak poluge pa je Matthey morao napraviti još primjeraka. Napravljene su mnoge analize Trescinih poluga iz 1874. te je zaključeno da zadovoljavaju zahtjeve nacionalnih standarda, pa su se od njih napravile poluge koje su zahtijevale ostale države. 1882. se francuska Vlada opet našla u ulozi sponzora za izradu čak 30 poluga za mjeru metra i 40 cilindara za mjeru kilograma. Pred Mattheya su bili stavljeni izrazito oštri zahtjevi pa su tako gotove legure poluga morale imati u svom sastavu određenu količinu platine (89,75 do 90,25%), iridija (9,75 do 10,25%), a nečistoće su morale imati udio od 0,1% (rutenij i željezo), 0,15% (rodij i paladij) i 0,02% (bakar, zlato, srebro i dr.) [9].

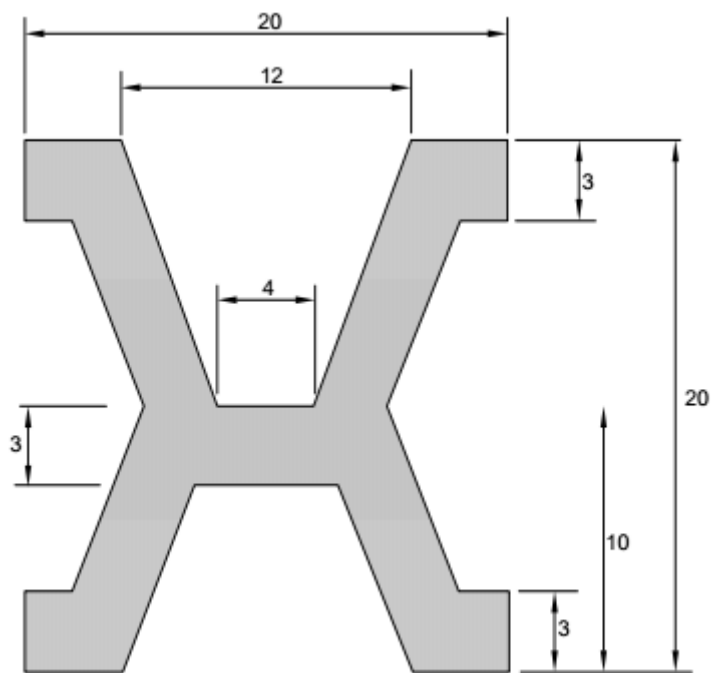
Naposljetku je Međunarodna komisija za metar bila odgovorna za obilježavanje mjera metra na polugama i podešavanje cilindara za kilogram.

Na prvoj Generalnoj konferenciji za mjere i utege 1889. je jedna od poluga bila izabrana za međunarodnu pramjeru metra.

Službena definicija metra je bila:

„Ovaj prototip, pri temperaturi topljenja leda, će od sada predstavljati mjernu jedinicu duljine“

Definicija je bila razmjerno općenita i nije sadržavala neke detalje o tome kako točno treba postaviti polugu pramjere, ali je kasnijom definicijom i taj nedostatak uklonjen.



Slika 4.2 – Poprečni presjek pramjere metra [1]

Godine 1927. Generalna konferencija postavila je sljedeću definiciju metra:

„Jedinica duljine je metar koji je pri temperaturi 0 °C definiran razmakom između dvije srednje crtice na pramjeri metra, pohranjenoj u Međunarodnom birou u Sevrusu. Pramjera ima točno dužinu 1 metar kada je pri normalnom atmosferskom tlaku poduprta u vodoravnom položaju sa dva valjka promjera 1 cm koji su međusobno udaljeni 571 mm“.

5 DEFINIRANJE METRA VALNOM DULJINOM

Praćenjem duljine kroz godine utvrđene su sve veća odstupanja između međunarodnog prametra i nacionalnih prametara. Pokazalo se da pramjere nisu bile u mogućnosti osigurati stalnost fizikalnih veličina. Sedamdeset godina je prametar bio osnova metričkog sustava i došlo je vrijeme da ga zamijene još točnije metode definiranja metra [2].

Francuski fizičar Jacques Babinet je još 1827. ocijenio da je potrebno umjesto nekom materijom, duljinu definirati pomoću valne duljine vidljivog spektra svjetlosti. Iste godine je njegovom zaslugom usvojena i nova mjerna jedinica za duljinu, angstrom. Ona je jednaka 0,1 nm. U tom razdoblju je bio začetak nove grane znanosti nazvane spektroskopijom koja se bavi proučavanjem međudjelovanja između emitiranog zračenja i materije [12].

1859. godine je škotski fizičar James Clerk Maxwell predložio korištenje prirodnih elemenata za emitiranje zračenja koje bi bilo korišteno za definiranje duljine. Predložio je valnu duljinu žute spektralne linije natrija, ali je primijećeno da se takva svjetlost sastoji od dva različita zračenja, te je brzo bila odbačena [12].

Možda najznačajniji korak naprijed na području modernog definiranja duljine je napravio fizičar Albert Abraham Michelson, dobitnik Nobelove nagrade iz područja fizike. Nobelova nagrada koju je dobio 1907. je bila upravo za značajan doprinos u mjeriteljstvu za razvoj preciznih optičkih mjernih instrumenata. Bio je prvi Amerikanac koji je dobio Nobelovu nagradu iz fizike.

Michelson je bio fasciniran problemom mjerenja brzine svjetlosti. 1879. godine je izmjerio brzinu svjetlosti u zraku i dobio rezultat od $299,864 \pm 51$ kilometara u sekundi i procijenio brzinu svjetlosti u vakuumu kao 299,940 km/s. Nakon toga je boravio u Europi 2 godine, nakon čega se vratio u Sjedinjene Američke Države i koncentrirao na razvoj mjeriteljski vrlo važnog interferometra. Na kraju 19. stoljeća, 1890. godine je Michelson otkrio da je crvena spektralna linija prirodnog kadmija izuzetno koherentna i uspio je izmjeriti međunarodnu pramjeru metra s obzirom na valnu duljinu crvene linije kadmija.

Potvrda njegovih istraživanja je stigla 1906. kad je uz pomoć Fabry-Perotovih etalona izmjerena pri 15 °C u suhom zraku valna duljina kadmija $\lambda_{Cd} = 6\,438,4696 \times 10^{-6} \text{ m}$.

Fabry-Perotovi etaloni se sastoje od dva paralelna djelomično reflektivna zrcala koja su okrenuta jedno prema drugome. Interferencija koju izazivaju djeluje kao filter koji propušta samo rezonantne vrhove spektra svjetlosti čije su frekvencije jednako

udaljene. Udaljenost između zrcala određuje tu udaljenost između vrhova, dok stupanj refleksivnosti zrcala određuje širinu vrhova spektra. [11]

Mjerenje metodama interferencije se pokazalo izuzetno pogodnim za mjerenje malih varijacija duljine i za mjerenje malih etalona s ravnim završetcima, jer je te elemente teško podvrgnuti optičkoj komparaciji pomoću skale. Interferometri pružaju izravno mjerenje udaljenosti između dva kraja etalona, baze na kojoj je smješten i slobodnog kraja.

S obzirom da se upotreba graničnih mjerki povećala s zbog napretka u industriji, 1920. godine je A. Pérard izradio prvi interferometar za njihovo umjeravanje. Njegov uređaj je bio u upotrebi u Međunarodnom uredu za mjere i utege sve do 1971. godine [12].

Sve veća upotreba interferometara je rezultirala istraživanjima o pogreškama koje se javljaju pri mjerenju. Tako je posebno bitno bilo istražiti indeks loma svjetlosti u zraku kako bi se mogla izračunati prava valna duljina izvora emitiranog zračenja.

Naravno, vršena su istraživanja i o mjeriteljskim svojstvima samih zračenja izvora svjetlosti. Tako je 1921. Pérard sistematski istraživao svojstva kadmija, žive, helija, neona, kriptona, cinka i talija. Njegovo istraživanje je pokazalo da valna duljina svakog od navedenih zračenja varira s promjenom udaljenosti na kojoj se vrši mjerenje. Taj nepoželjan efekt se pojavio i kod kadmija, ali puno manje kod crvene spektralne linije nego kod plave i zelene. Nakon što je pokazao njegove nedostatke, Pérard se protivio kadmiju kao zračenju za definiranje metra [12].

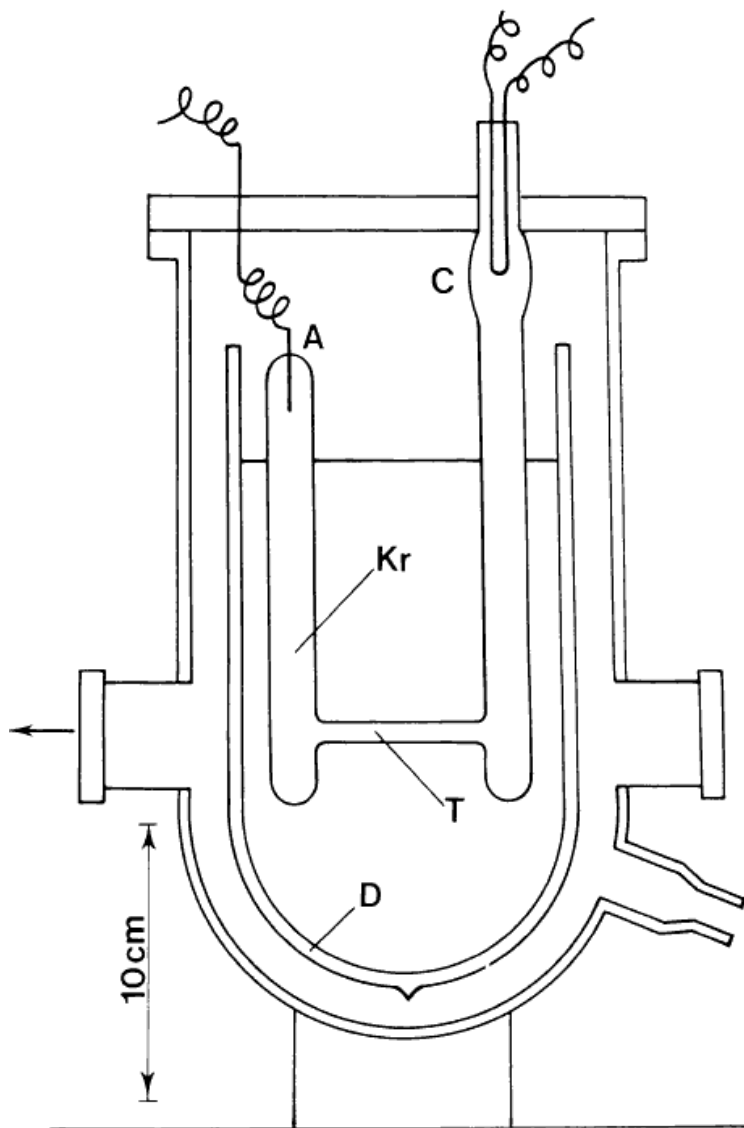
U godinama koje su slijedile su otkriveni razlozi zbog kojih valna duljina emitiranih zračenja prirodnih elemenata varira. Najveći razlog za variranje je bio u tome što je svaki prirodni element zapravo mješavina nekoliko različitih izotopa čije se spektralne linije ne poklapaju. Magnetska svojstva atomskih jezgara tih izotopa s druge strane utječu na njihovo emitirano zračenje. Idealan element bi stoga bio čisti izotop čija je jezgra slobodna od magnetizma. Takav izotop bi imao parni atomski (Z) i parni maseni broj.

Emitirana zračenja prirodnih elemenata imaju uvijek veću širinu spektra nego što ti elementi imaju u prirodi. Jedan od razloga tomu je Dopplerov efekt na atomskoj razini. Kada se atom približava mjeriteljskom uređaju, njegova valna duljina se smanjuje, a kako se udaljava tako ona raste. U plinovima se primjećuje i efekt temperaturne uzburkanosti atoma pa oni emitiraju nešto drugačije zračenje u ovisnosti o promjeni temperature. Ovaj efekt uzrokuje nasumične promjene komponenata brzine što uzrokuje širenje spektralne linije. Spomenuti efekti su ponukali istraživače da izaberu element koji bi emitirao stabilan spektar zračenja i pri niskim temperaturama [12].

1950-ih godina je znanost već dovoljno poznavala izotope tako da je izdvojila tri nuklida: kadmij 114 ($Z=48$), živa 198 ($Z=80$) i kripton 84 ili 86 ($Z=36$). Između njih je trebao biti izabran referentan izvor zračenja za novu definiciju metra. Odlučeno je da će biti izabrana najoštija od predložene tri spektralne linije, a to je bila narančasta linija kriptona 86. Ona je izvedena s minimalnim mjerljivim smetnjama iz lampe sa hladnom katodom, čije su kapilare bile ohlađene na temperaturu trojne točke dušika ($-210\text{ }^{\circ}\text{C}$). Za lampu je ustanovljeno da ima vrlo malo izražen efekt samoapsorpcije i da daje dovoljno svjetla [12]. Prikazana je na slici 5.1.

Na kraju je 14. listopada 1960. na jedanaestoj Generalnoj konferenciji za mjere i utege ustanovljena nova definicija metra:

„Metar je duljina jednaka 1650763,73 duljine vala u vakuumu zračenja koje odgovara prijelazu između razina 2 p10 i 5 d5 atoma kriptona 86“.



Slika 5.1 – Lampa kriptona 86 [12]

Na radne uvjete lampe su bile definirane tolerancije na temperaturu (± 1 °K) i na gustoću električne struje ($\pm 0,1$ A/cm²). Karakteristike ove lampe je proučavalo nekoliko državnih laboratorija u cilju pronalaska odstupanja od valne duljine.

U 1960im godinama je bilo moguće kroz modifikacije sustava za detekciju linija interferencije postići očitavanje od $\pm 0,0001$ linije ili bolje [12].

Uzimajući u obzir utjecaj temperature lampe, gustoće električne struje i Dopplerov efekt, napravljena je usporedba rezultata između laboratorija koja pokazuje utjecaj tih čimbenika na promjenu broja valova u m⁻¹ (tablica).

Tablica 5.1

T (K)	PTB-BIPM (1960)	NSL (1961)	NPL (1961)	NRC (1961)	NSL (1962)	PTB (1958)
68		-0,030			-0,031	
64		-0,005		-0,001	-0,004	
63	-0,001	-0,001	-0,007	+0,002	0,000	+0,006
62		+0,004		+0,013	+0,008	
60		+0,021		+0,020	+0,023	

Rezultati pokazuju da je tada bilo moguće postići točnost od 1 djela na 10^9 , odnosno 0,0000001% koristeći Fabry-Perotov interferometar u vakuumskim uvjetima. Međutim, zbog pogrešaka poput malih odstupanja od ravnosti interferometarskih ploča i odstupanja od uvjeta okoliša takva točnost nije iskoristiva u praksi kao što je i pokazano tablicom.

5.1 Michelsonov interferometar

Michelson je u Međunarodni ured za utege i mjere 1892. donio za to vrijeme neobičan uređaj za kojeg je tvrdio da mu omogućuje mjerenje „*vrijednosti duljine pomoću valnih duljina svjetlosti*“. Njegov uređaj je zaslužan za daljnji razvoj mnogih drugih uređaja koji su se koristili principima za koje je on postavio temelj. U svom radu se usredotočio na jedinu varijablu koje ljudsko oko može vidjeti, a to je broj linija (pruga) svjetlosti. Nekoliko tehnoloških poboljšanja njegovog uređaja je postavilo brojenje linija interferencije svjetlosnih valova (engl. fringe-counting) kao vrlo točan način mjerenja duljine.

Michelson je svoj interferometar zvao mjerачem refrakcije (refraktometrom), interferencijskim komparatorom ili valnim komparatorom, ali je bio posve svjestan moguće upotrebe novog uređaja [10].

Interferometar je osmišljen s ciljem pronalaska linija interferencije kojima bi mogao duljinu izmjeriti točnije no što je to bilo moguće pramjerom duljine. Da bi to postigao, morao je naći tvar koja bi mu dala iznimno kontrastne i brojne linije interferencije.

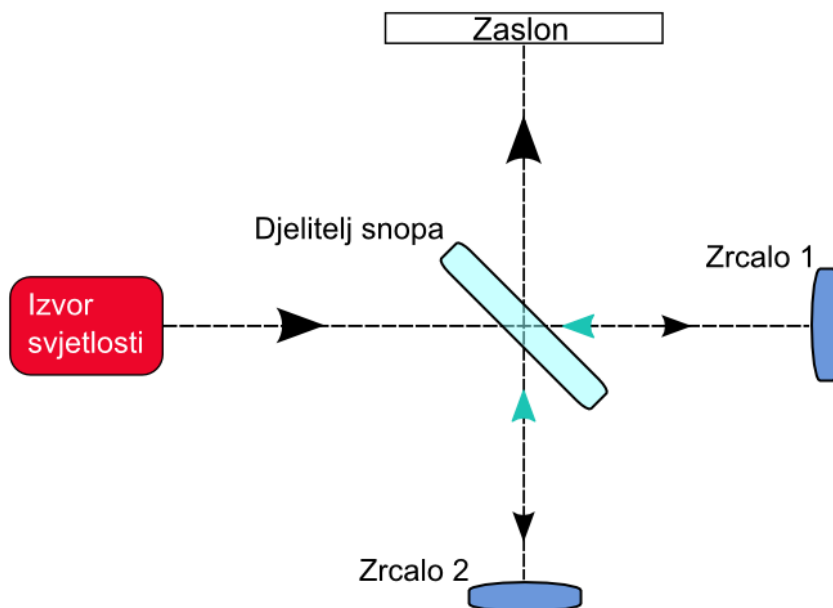
Odmah na početku ispitivanja je primijetio da svjetlo natrija daje linije interferencije kojima intenzitet varira, odnosno da su neke linije jasnije od drugih. Nakon toga je otkrio i još jedan faktor koji utječe na vidljivost linija, a to je bila udaljenost. Primijetio je da se značajno smanjuje vidljivost linija kada je udaljenost između putanja izvora svjetlosti veća od 10 cm. Tu pojavu je pripisao Dopplerovom efektu zbog kojeg se javljaju duplikati linija interferencije, te je odlučio potražiti neki drugi izvor svjetlosti.

Kao prvi potencijalni bolji izvor svjetla je promatrao živu, ali je ubrzo primijetio da iako liniju interferencije može izolirati pomoću monokromatora, ona su pokazivale neobične i kompleksne varijacije u intenzitetu. Nakon toga je promatrao linije vodika, litija, kisika, cinka i talija. Ponovno je primijetio varijacije u intenzitetu i pripisao ih Dopplerovom efektu [10].

Naposljetku je došao do kadmija koji je korišten pri mjerenjima 1892. i 1893. u Međunarodnom uredu za utege i mjere. Iako Michelson nije u svojim radovima nigdje posebno diskutirao problem optičkih i mehaničkih pogrešaka u svom uređaju, rezultati su pokazali da je uređaj iznimno točan, iako nije bio posebno sofisticiran. Isplativost takvog uređaja se pokazalo izvrsnom, a rezultati su bili vrlo koherentni.

Njegov interferometar je značajan zato što je postavio temelje interferometriji, te zato što se i danas koristi ovakav princip uz neka poboljšanja i minijaturizaciju.

5.1.1 Princip rada Michelsonovog interferometra

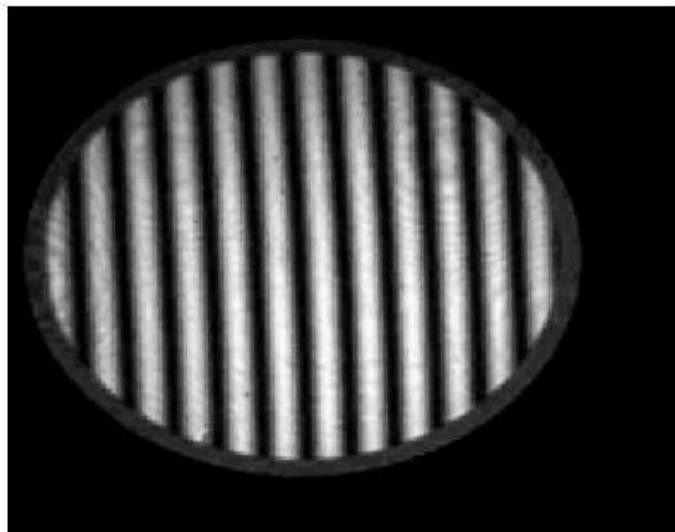


Slika 5.2 - Pojednostavljeni prikaz Michelsonovog interferometra

Izvor svjetlosti emitira snop prema djelitelju snopa koji ga razdvaja u dva snopa približno jednakog intenziteta. Jedan snop odlazi na zrcalo 2 koje je pomično a drugi odlazi na referentno fiksno zrcalo 1. Na oba zrcala se događa refleksija te se valovi vraćaju približno istim putanjama na djelitelj snopa.

S obzirom da su valovi svjetlosti došli od istog izvora, oni su međusobno koherentni i pri povratku na djelitelj snopa svjetlosti događa se interferencija koja se prikazuje na zaslonu. Reflektirani snopovi su na slici 5.2 označeni plavom strelicom.

U ovako postavljenom sustavu moguće je mijenjati udaljenost zrcala 2 od djelitelja snopa. Mijenjanjem te udaljenosti utječe se na prevaljeni put snopa s zrcala 2, a time i na prirodu interferencije, pa se tako ona izmjenjuje između destruktivne (svijetle linije) i konstruktivne (tamne linije) kao što je prikazano na slici 5.3 na slijedećoj stranici.



Slika 5.3 – Linije (pruge) interferencije

Preciznim pomicanjem zrcala 2 (npr. mikrometarskim vijkom) se mijenja neka udaljenost L , a istovremeno se mjeri koliko se puta izmijenila linija interferencije N iz svijetle u tamnu. Na taj način se povezuju dvije veličine – duljina L i valna duljina svjetlosti λ i vrlo točno izračunava duljina L s obzirom na broj promjena linija interferencije.

Uz emitiranu svjetlost poznate valne duljine λ je lako izračunati udaljenost L putem jednadžbe [1]:

$$L = (N + f) \frac{\lambda}{2}$$

Gdje je:

L -duljina za koju je pomaknuto zrcalo 2

N -cijeli broj linija interferencije

f -ostatak ($0 < f < 1$)

λ – poznata valna duljina emitirane svjetlosti

Naravno, nezgodno je ručno brojati linije interferencije na zaslonu, ali se zato u današnjim interferometrima umjesto zaslona koriste fotosenzitivne diode ili CCD senzori (osjetljivosti većih od 0,15 nm) kako bi računalo izvršilo „brojanje“ i obradu podataka.

U praksi se ovakav interferometar koristi kao vrlo točan optički komparator.



Slika 5.4 – Jedan potpuni prijelaz iz konstruktivne u destruktivnu interferenciju

Valna duljina spektra vidljive svjetlosti koja se koristi u interferometrima je obično od 400 do 700 nm, tako da je jedna linija interferencije debljine od 200 do 350 nm. To znači da se rezolucija od 200-350 nm može postići samim brojanjem pruga [1].

Veću rezoluciju je moguće postići opremom koja može mjeriti ostatak f koji se dobije dodatnom podjelom linija interferencije. To dovodi do rezolucije od 0,001 linije što je otprilike veličina jednog atoma.

Korištenjem izvora svjetlosti manje valne duljine moguće je dodatno povećati točnost mjerenja jer se debljina jedne linije interferencije može laserom svesti na samo 0,2 nm pa se dodatnim podjelama može ući u područje pikometra.

6 AKTUALNA DEFINICIJA METRA

Definicija metra iz 1960. godine je bila temeljena na mjerenju valne duljine svjetlosti iz lampe s kriptonom 86. Razvojem lasera šezdesetih godina 20. stoljeća, mjeritelji su dobili novi izvor svjetlosti, a laser je kako su godine odmicala i njegova cijena padala našao primjenu u gotovo svim granama ljudske djelatnosti.

Laser je zanimljiv zbog toga što daje svjetlost koja je monokromatska, usmjerena i koherentna. Helij-neon laser je bio dio mjeriteljske opreme koja je korištena 1972. godine za istovremeno mjerenje frekvencije i valne duljine svjetlosti što je doprinijelo točnijoj definiciji brzine svjetlosti. Mjerna nesigurnost je procijenjena na $1,2 \text{ m s}^{-1}$, a ta točnija definicija je korištena za povezivanje frekvencija i valnih duljina ostalih lasera. Najslabija karika u korištenom mjeriteljskom lancu je bila stara realizacija metra pomoću lampe kriptona 86 koja je imala relativno visoku mjernu nesigurnost [1].

1970-ih godina se zbog povećanja točnosti usporedaba frekvencija lasera javila potreba za točnijom definicijom brzine svjetlosti. 1975. godine je brzina svjetlosti definirana iznosom od $299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$. S obzirom da je tako bila implicitno definirana i nova definicija metra, postojala je opasnost da se uspostavi skala laserskih valnih duljina koja bi bila izdvojena iz SI sustava mjernih jedinica [1].

Kako bi se izbjegle spomenute opasnosti usvojena je nova definicija metra 1983. godine koja je u potpunosti odbacila upotrebu koncepta realizacije metra valnom duljinom, ali i preporučila upotrebu valnih duljina lasera u realizaciji iste definicije.

Nova definicija metra tako od 1983. godine glasi:

„Metar je jednak duljini puta koji svjetlost prijeđe u vakuumu za vrijeme od $1/299\,792\,458$ dijela sekunde“.

Za praktičnu realizaciju metra Generalna konferencija za mjere i utege je definirala popis preporučenih valnih duljina zračenja i metoda., Što se zračenja tiče, najčešće se koristi vidljivo svjetlo helij-neon lasera stabiliziranog pomoću joda. Popis je dan tablicom 6.1 na sljedećoj stranici.

Tablica 6.1 – Preporučene valne duljine zračenja za realizaciju metra [1]

Laser	Apsorber	Frekvencija, Mhz	λ , nm
He-Ne	CH ₄	88 376 181,308	3392,231397
He-Ne	127I ₂	520 206 808,51	576,29476027
He-Ne	127I ₂	473 612 214,8	632,9913981
He-Ne	127I ₂	489 880 355,1	611,9707698
Ar ⁺	127I ₂	582 490 603,6	514,6734662

Preporuke Generalne konferencije za mjere i utege za realizaciju metra [1] :

- Metar može biti realiziran duljinom puta L koju je svjetlost ravnog elektromagnetskog vala prevalila u vakuumu za neko vrijeme t . Duljina se može izračunati iz izraza $L = c t$, a vrijednost brzine svjetlosti je $c = 299\,792\,458\text{ m s}^{-1}$
- Metar može biti realiziran valnom duljinom λ ravnog elektromagnetskog vala u vakuumu frekvencije f . Valnu duljinu se može izračunati iz izraza $\lambda = \frac{c}{f}$
- Metar može biti realiziran s jednim od zračenja na listi, čija se izražena valna duljina ili frekvencija u vakuumu može koristiti pod pretpostavkom da se poštuju dane specifikacije.

6.1 Kratak uvod u princip rada lasera

Laseri općenito za svoj rad koriste fenomen stimulirane emisije zračenja. Taj fenomen je teoretski opisao Albert Einstein u okviru svojeg rada na polju kvantne mehanike. Da bi do stimulirane emisije došlo, potrebno je imati atome koji moraju prijeći putem vanjske pobude u više energetske stanje. Atom u tom stanju teži ravnoteži i pokušava se spustiti u niže energetske stanje ali pritom emitira foton energije E . Iznos ove energije je opisan jednadžbom $E = h\nu$, gdje je h Planckova konstanta a ν frekvencija fotona. To je spontana emisija zračenja, odnosno luminiscencije. Ona podrazumijeva emisiju svjetlosti uzrokovanu zračenjem hladnog tijela što znači da uzrok svjetlost nije toplina kao u većini slučajeva [13].

Prolazak emitiranog fotona pored atoma sličnog višeg energetske stanja može inducirati identičnu pojavu. Emitirani foton i drugi fotoni koje je on izazvao će u tom slučaju biti potpuno isti i po frekvenciji, fazi, smjeru i polarizaciji.

Kako bi se dobio efekt laserske svjetlosti, potrebno je osigurati da vjerojatnost stimulirane emisije zračenja bude veća od vjerojatnosti za spontanu apsorpciju i emisiju. Veća vjerojatnost za stimuliranu emisiju zračenja se postiže stvaranjem efekta inverzije populacije, odnosno osiguravanjem da na željenom području budu brojniji atomi u višem energetske stanju od onih nižeg energetske stanja. Za funkcioniranje lasera takvo se stanje mora održavati konstantnim.

6.2 Helij-neon laser

Karakteristike koje su ovaj tip lasera izdvojile kao važan u mjeriteljstvu su sigurno njegova pouzdanost i sjajna optička svojstva. Šum u izlaznom snopu je vrlo malen, stabilnost je odlična a koherentnost snopa doseže i duljine od nekoliko kilometara. Danas su to kompaktni uređaji koji se mogu proizvoditi u velikom broju komada s odličnom ponovljivošću između proizvedenih komada. Jedni su od najmanje učinkovitih lasera, ali ih je moguće pogoniti s običnog jednofaznog napajanja.

Dalje u tekstu će biti opisan općeniti način rada tog lasera uz napomenu da su korištene informacije direktno iz materijala tvrtke Melles Griot koja je vodeći svjetski proizvođač ovih lasera.

6.2.1 Podrobniji opis helij-neon lasera

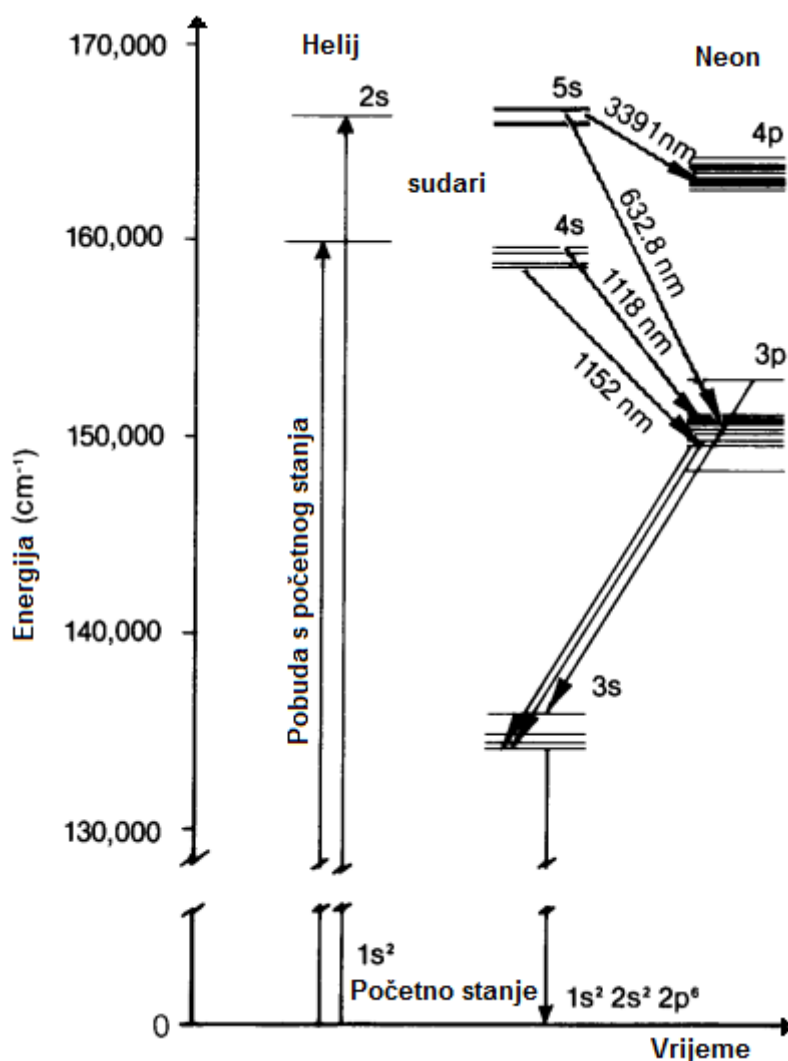
Helij-neon laseri kao što i ime sugerira, sadrže tanku cijev s mješavinom ta dva plina. Pretežno se radi o heliju, dok je neona otprilike 10%. Ovim dvjema plinovima se često dodaju i neke mješavine izotopa kako bi se postigao što jači laserski snop, ali to ovisi o proizvođaču.

Mješavina plina se u cijevi ionizira električnim izbojem velikog električnog napona i relativno male električne struje. Tako se formira plazma koja sadrži velik broj atoma helija u metastabilnom, odnosno pobuđenom stanju. U tom stanju se energetske stanje jednome od valentnih elektrona helija podiže sa stanja 1s i 2s, te u tom stanju atomi ostaju u relativno dugom vremenu s obzirom da se prema zakonu selekcije kvantne mehanike oni ne mogu odmah vratiti na prijašnju razinu [13].

Nadalje se događaju sudari metastabilnih atoma helija i atoma neona, te se spontano podižu energetske stanja valentnih elektrona neona s razine 2p na 4s i 5s. Energetske razine 2s helija, te energetske razine 4s i 5s helija su vrlo bliske tako da je zbog toga puno vjerojatnije da će se dogoditi ovakva pobuda. Tranzicija ovako pobuđenih atoma neona s energetske stanja 5s na 3p uzrokuje emisiju laserskog snopa valne duljine 632,8 nm.

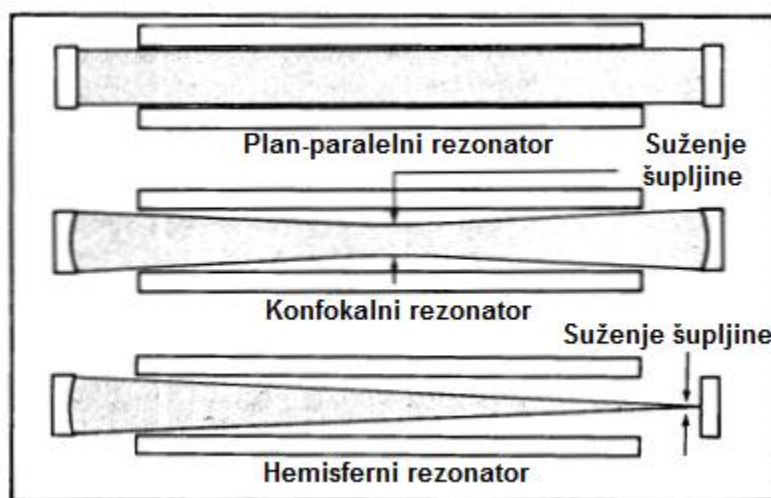
Nakon što metastabilni atom helija pobudi atom neona, on se vraća u početno stanje. Međutim, zbog toga što je sadržajem mješavine plina osigurano da je helijevih atoma oko 10 puta više, ostaje vrlo visoka vjerojatnost da će se nastaviti inducirana pobuda neonovih atoma. Prikaz opisane reakcije je dan slikom 6.1.

Jedan dio zračenja će biti prolaziti paralelno sa stjenkama cijevi, a drugi dio će prolaziti kroz stjenke cijevi te neće sudjelovati u funkcioniranju lasera. Foton koji prolazi usporedno sa stjenkama cijevi će imati vjerojatnost od 10% da prođe pored još jednog pobuđenog atoma neona i da stimulira emisiju još jednog identičnog fotona. Da bi ta vjerojatnost bila povećana, s oba kraja cijevi se postavljaju zrcala koja u više navrata reflektiraju fotone kako bi oni imali veću šansu za ostvarivanje dodatne emisije fotona. Svaki novi foton ima šansu ponoviti taj proces što rezultira postepenim (optičkim) pojačanjem svjetlosti.



Slika 6.1 – Tijek energije u He-Ne laseru [13]

Spomenuta zrcala zajedno sa stjenkama cijevi tvore rezonator, odnosno rezonirajuću optičku šupljinu zbog koje dolazi do karakteristike selektivnog pojačanja svjetlosti u laseru. Prikaz korištenih vrsta rezonatora je dan slikom:



Slika 6.2 – Vrste rezonatora u He-Ne laserima

Zrcala rezonatora su presvučena reflektirajućim slojem kako bi propuštala nepoželjne, a reflektirala željene laserske linije zračenja. Zrcala se dakle ponašaju kao filter što na kraju znači da je rezultat pojačanje ograničeno samo na jednu valnu duljinu i vrlo usmjeren snop zračenja. U praksi se jedno zrcalo izvodi kao polupropusno za potrebnu valnu duljinu, a propusnost je obično 1%. To znači da je tih 1% svjetlosti koje prolazi kroz zrcalo zapravo upotrebljivi snop lasera, što pak znači da je unutarnji snop 100 puta jači od snopa što izlazi van.

Na slici 6.2 se vide razni oblici korištenih rezonatora zajedno s oblikom aktivnog volumena plazme. Najčešće korišteni oblik je kvazi-hemisferni rezonator koji je zapravo skraćena inačica hemisfernog rezonatora. On se koristi iz razloga što je malih dimenzija i vrlo stabilan. Njegova mana je što koristi otprilike samo trećinu mogućeg volumena aktivne plazme zbog fokusiranja konkavnog zrcala. To mu ograničava moguću maksimalnu snagu. Međutim, činjenica da daje vrlo koherentnu svjetlost i da je lagan za podešavanje ga čini glavnim izborom.

S druge strane, prema slici bi se moglo zaključiti da je najpovoljniji tip rezonatora plan-paralelni jer ima potencijal u potpunosti iskoristiti dostupni volumen aktivne plazme te time imati najveću efikasnost. No, on se u praksi nikada ne koristi zbog svoje izuzetne nestabilnosti i velikih gubitaka zbog ogiba svjetlosti.

Konfokalni rezonator ima dva konkavna sferna zrcala jednakog radijusa od kojih je svako smješteno na centar zakrivljenosti nasuprotnog zrcala. Volumen aktivne plazme je i dalje razmjerno velik što za sobom povlači i veliku izlaznu snagu. On je nešto manje osjetljiv na podešavanje zrcala, ali je osjetljiv na točnost njihovog pozicioniranja, odnosno njihovu udaljenost. Rijetko se koristi kada je traženi mod lasera TEM₀₀.

6.2.2 Modovi helij-neon lasera

Postojanje optičke šupljine dovodi do longitudinalne oscilacije, odnosno do stojnih valova koji definiraju koje će valne duljine svjetlosti biti pojačane. Refleksije koje su izvan faze brzo nestaju kroz destruktivnu interferenciju. Za postojanje stojnog vala (ili moda stojnog vala), duljina optičke šupljine (rezonatora) mora biti točno jednaka cijelom broju valnih duljina:

$$2L = m\lambda$$

Gdje je L duljina šupljine, m je cijeli broj, a λ je valna duljina svjetlosti.

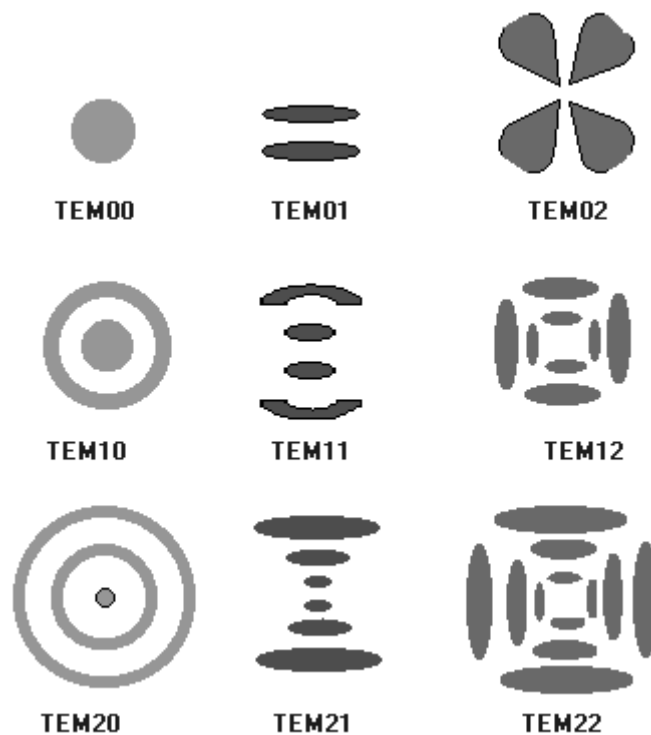
Iz toga slijedi rezonantna frekvencija:

$$\nu = \frac{mc}{2L}$$

Gdje je ν rezonantna frekvencija, m je cijeli broj, L je duljina šupljine, a c je brzina svjetlosti u vakuumu.

Takve rezonantne frekvencije definiraju iznimno mali pojas unutar kojeg se može dogoditi oscilacija lasera. Frekvencijska separacija tih rezonancija je inverzno proporcionalna duljini optičke šupljine rezonatora pa je pojas definiran jednadžbom:

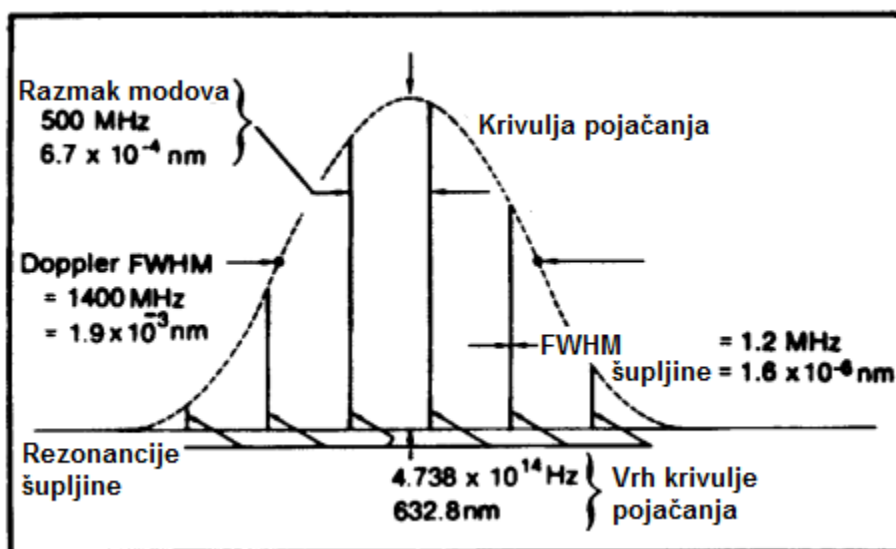
$$\Delta\nu = \frac{c}{2L}$$



Slika 6.3 – Transverzalni (TEM) modovi lasera

Da bi došlo do optičkog pojačanja longitudinalnih modova, svaka od njihovih pojedinačnih frekvencija mora biti unutar širine spektralne linije prirodnih tranzicija atoma helija i neona.

S obzirom da dolazi do nasumičnih kretanja atoma u plazmi zbog topline, spomenuta spektralna linija će biti proširena zbog Dopplerovog efekta. Modovi koji upadaju u takvu spektralnu liniju će biti pojačani kako je prikazano na slici 6.4 gdje je prikazana krivulja koja podržava postojanje 6 različitih longitudinalnih modova. Krivulja je istog oblika kao i profil linije spontane emisije zračenja. FWHM (Full Width at Half Maximum) je izraz za (punu) širinu pri polovici maksimuma krivulje pojačanja.

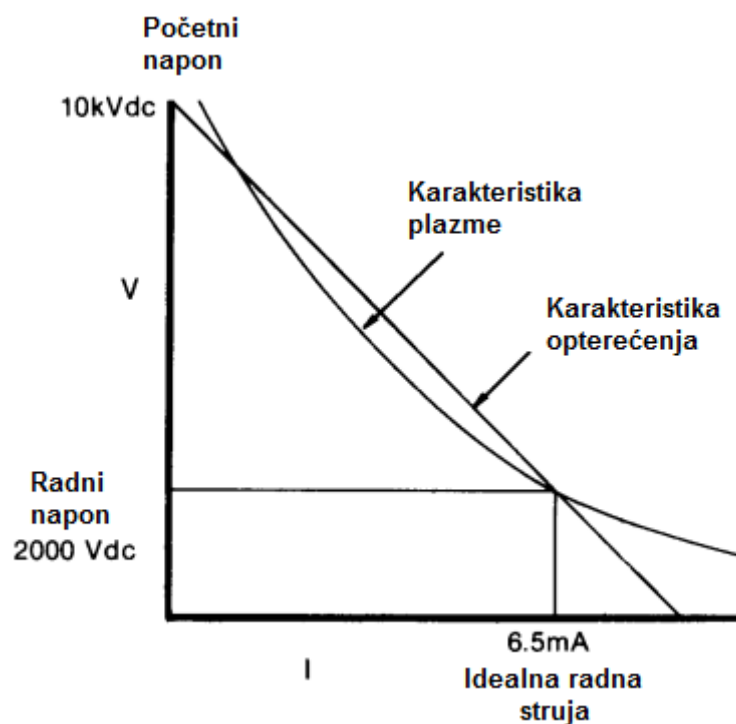


Slika 6.4 – Dopplerova proširena krivulja pojačanja

Uz longitudinalne modove, u rezonatoru se stvaraju i njima poprečni modovi (engl. TEM – transverse electric and magnetic modes). To su modovi čija distribucija zračenja može sadržati jednu ili više nula, odnosno „rupa“ u emisiji. Oni se šire po ravnini koja je poprečna ravnini širenja longitudinalnih valova, odnosno modova.

Neka su indeksi u nazivu tih modova p i q (TEM_{pq}). Tada p i q označavaju broj nula po dvije ortogonalne osi koje tvore ravninu poprečnu ravnini širenja longitudinalnih valova. Prema slici 6.3 na prethodnoj stranici jasno se može zamijetiti da je najpoželjniji mod TEM_{00} koji nema niti jednu nulu u emisiji zračenja. Takav mod ima minimalne gubitke zbog ogiba i divergencije svjetlosti i prema tome može biti fokusiran u najmanju moguću točku. Za realizaciju većine TEM_{00} lasera koriste se kvazi-hemisferni rezonatori čija je kolimacija snopa ograničena samo stupnjem difrakcije svjetlosti. Većina He-Ne lasera ima divergenciju izlaznog snopa od 0,8 to 1,5 miliradijana.

He-Ne laseri električki gledano funkcioniraju kao obrnuti otpornici. Potreban im je veliki početni napon za pokretanje reakcija, a potom je za zadržavanje snopa potreban višestruko manji napon. U seriju s laserom je spojen otpornik koji se ponaša kao balast strujnog kruga kako bi osigurao minimalnu sigurnu impedanciju. Svako napajanje He-Ne lasera se projektira s točno zadanom idealnom razinom električne struje na umu. Naime, time se postiže maksimalna efikasnost lasera, a generirana struja se pokušava održati što stabilnijom mogućom. Prikaz radne karakteristike He-Ne lasera je dan slikom 6.5.

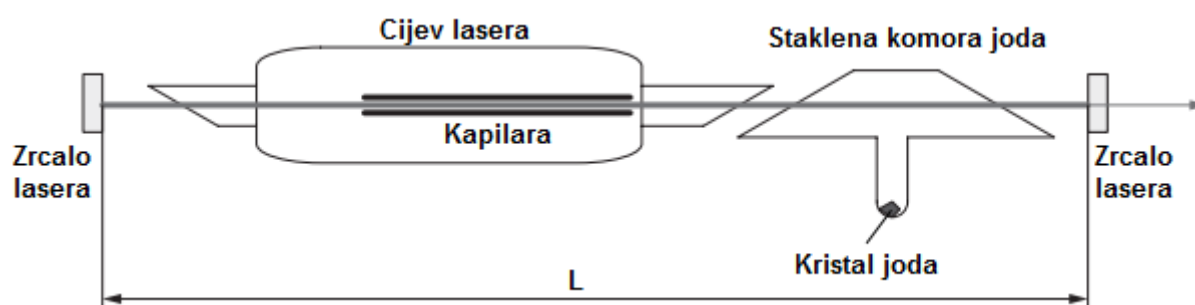


Slika 6.5 – Radna karakteristika He-Ne lasera

6.3 Jodno stabilizirani helij-neon laser

Za realiziranje standarda duljine prema zadnjoj definiciji iz 1983. godine koristi se jedno stabilizirani helij-neon laser. Nije mnogo drugačiji od običnog helij-neon lasera, ali ima svoje specifičnosti koje će ovdje biti opisane.

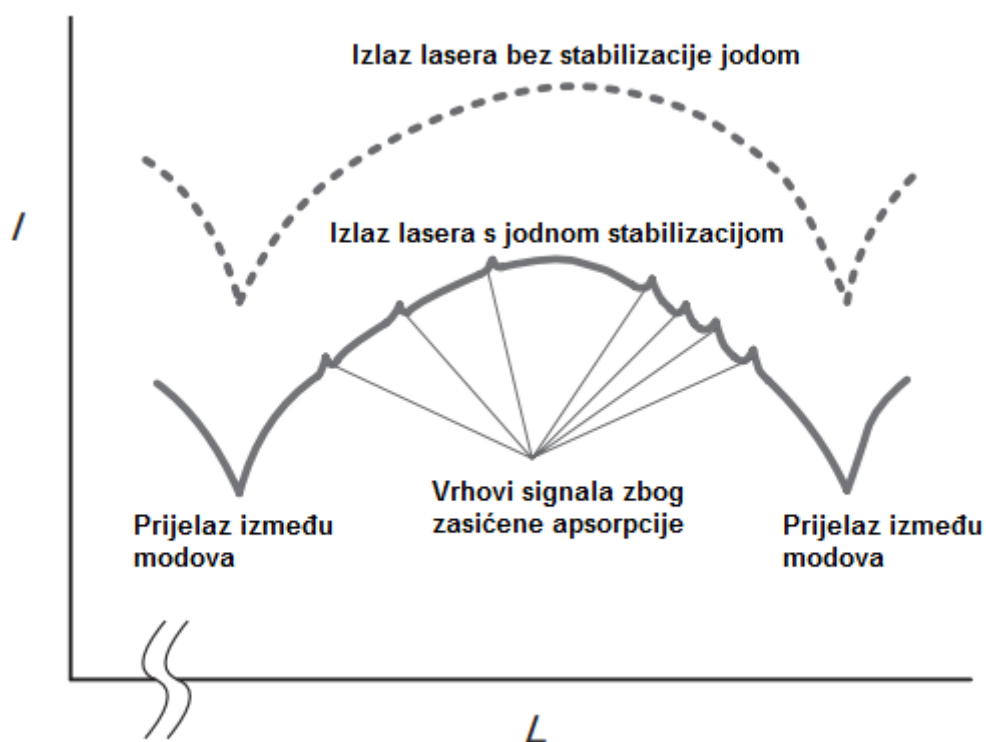
Shematski prikaz ovakvog lasera je dan slikom:



Slika 6.6 – Shematski prikaz jedno stabiliziranog He-Ne lasera

Prolazom laserske svjetlosti kroz staklenu komoru s jodom događa se apsorpcija svjetlosti od strane kristala joda, te ona u određenoj mjeri mijenja izlaznu svjetlost lasera. S obzirom na prisutnost longitudinalnih stojnih valova u rezonatoru, dolazi do zasićenja apsorpcije kristala joda. Apsorpcija je slabija na sredini valne duljine zasićene

apsorpcije, pa je izlazni snop lagano pojačan i javlja se nepravilni vrh na izlazu lasera. Ovaj fenomen omogućava spektroskopiju izuzetno visoke rezolucije bez pojave Dopplerovog efekta. Jedno stabilizirani laseri koriste taj nepravilni vrh na izlaznom signalu kao marker kako bi se što preciznije mogla kontrolirati i centrirati valna duljina lasera. Prikaz ovog fenomena je dan slikom [14] :



Slika 6.7 – Odnos između izlaza lasera I i razmaka zrcala L

Prikazani vrhovi izlaznog signala nisu lako uočljivi jer je odnos izlaznog signala i šuma zbog električnog izboja prilično malen. Kako bi se ipak ti vrhovi apsorpcije mogli uočiti koristi se modulacija frekvencije lasera.

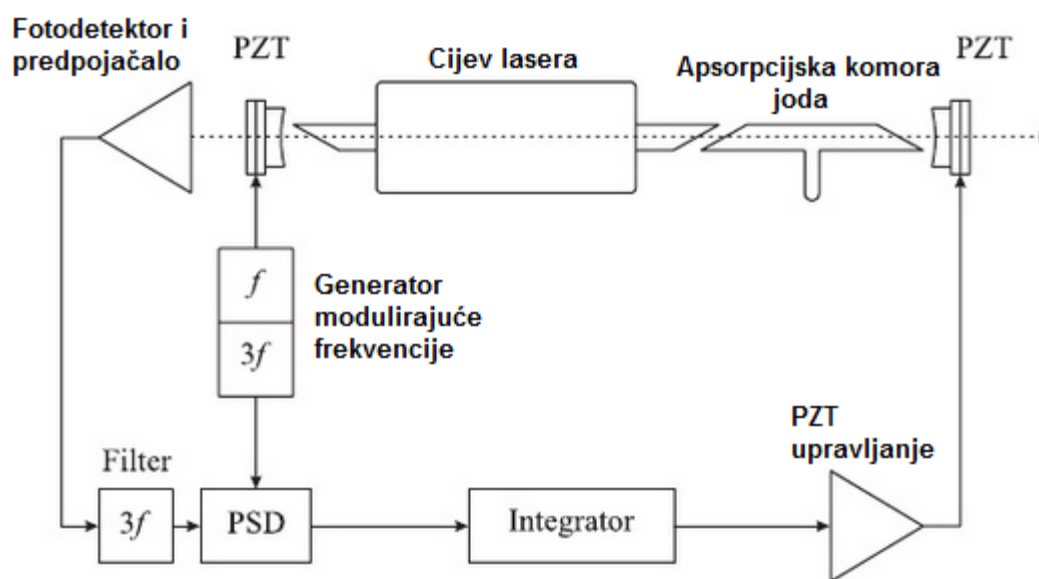
6.3.1 Postizanje stabilnosti lasera

Vrhovi signala koji su se javili zbog apsorpcije molekula joda se nalaze zamaskirani pod velikom količinom šuma koji se javlja zbog samog napajanja. Metoda koja se koristi za izdvajanje tih vrhova signala zove se fazno osjetljiva demodulacija. Ta metoda se koristi za izdvajanje signala iz poznatog nosećeg vala u situacijama kad je odnos signala i šuma vrlo nizak.

Moduliranje frekvencije lasera postiže se periodičkim mijenjanjem udaljenosti L između zrcala rezonatora. Udaljenost se mijenja promjenom napona na piezoelektricima na

koje su pričvršćena zrcala. Promjena frekvencije titranja piezoelektrika (na slici PZT) je u rasponu od nekoliko kilohertza [15].

Tako dobivena modulirana frekvencija dolazi na sklop za fazno osjetljivu demodulaciju (na slici PSD). On se sastoji od pojačala koje mijenja polaritet svakog poluciklusa moduliranog signala. Zbog tih promjena u polaritetu, sve komponente frekvencije signala integriranjem poprimaju vrijednost nule osim onih koje se javljaju zbog same frekvencije moduliranja. Opisani sustav jedno stabiliziranog He-Ne lasera je prikazan slikom:

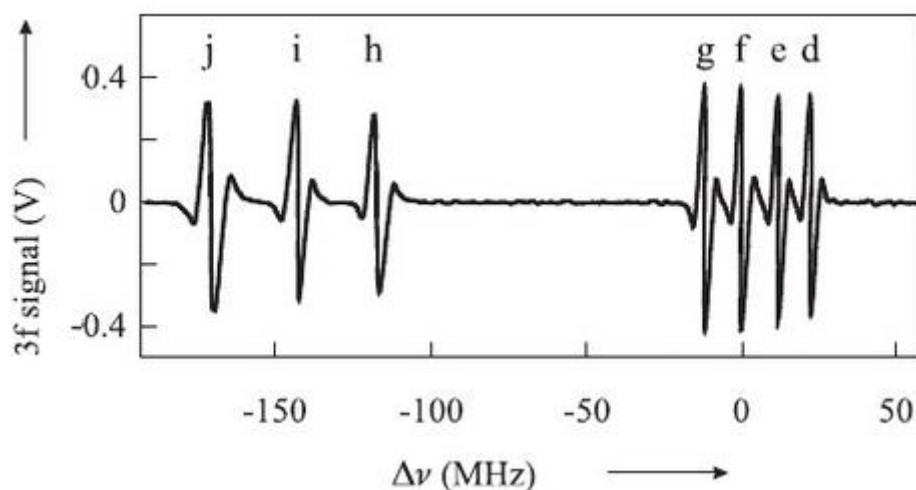


Slika 6.8 – Shematski prikaz stabilizacije He-Ne lasera

Za stabiliziranje se obično koristi tzv. tehnika trećeg harmonika. Komponente trostruke (kutne) frekvencije moduliranog signala se filtriraju iz signala i dovode do pojačala za fazno osjetljivu demodulaciju. Taj signal ne sadrži konstantne i linearne komponente pozadine signala (šuma) zbog toga što je takav signal proporcionalan trećoj derivaciji signala. Prikazan je slikom 6.9.

Stoga, sredina signala ostaje nepromijenjena kao što je prikazano na slici. Upravo ta sredina signala odgovara središtu frekvencija apsorpcijskih linija i može se koristiti za frekvencijsku stabilizaciju lasera [15].

Vrijednost frekvencije f je preporučen od strane Međunarodne komisije za utege i mjere i iznosi 473 612 353 604 kHz.



Slika 6.9 – Signal trećeg harmonika joda

Jodno stabilizirani laser je tako trenutno najtočniji i preporučeni način za definiranje metra. Razvoji u industriji i masovna proizvodnja su doveli do toga da je za sklapanje takvog uređaja potrebno višestruko manje novca nego što je bilo potrebno u prvih nekoliko desetljeća nakon njegovog pronalaska. Kao rezultat stoji činjenica da velika većina ozbiljnih državnih mjeriteljskih instituta i laboratorija imaju jodno stabilizirani laser u svom asortimanu uređaja.

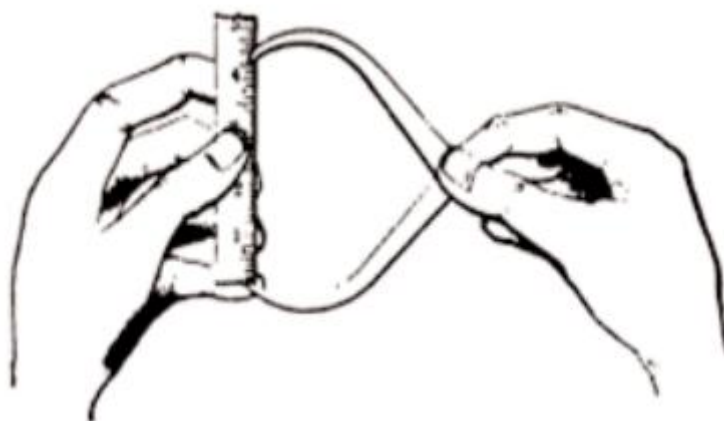
7 PLANPARALELNE GRANIČNE MJERKE

Nakon industrijske revolucije i uvođenja mnogih za to vrijeme naprednijih tehnologija proizvodnje javila se potreba za proizvodnju izmjenjivih dijelova. To razdoblje je donijelo porast zahtjeva koji su bili stavljeni pred mjeriteljstvo i stari sustavi usporedbi mjera više nisu te zahtjeve mogli ispuniti. Pronalaskom planparalelnih graničnih mjerki (dalje u tekstu: etalona) čovječanstvo je dobilo široko prihvaćen, jednostavan i relativno jeftin materijalizirani etalon duljine koji se koristio, a i danas se koristi u čitavom svijetu.

7.1 Povijesni razvoj etalona

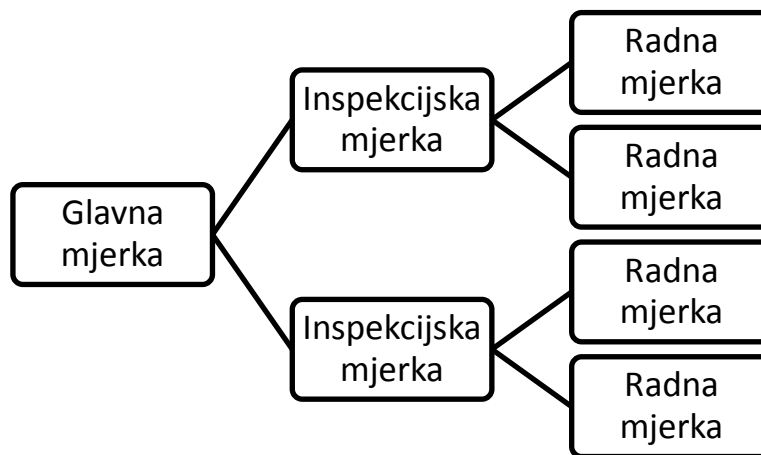
7.1.1 Metode mjerenja prije pojave etalona

Do pojave etalona industrijski radnici su se snalazili s raznim vrstama mjerki. Tako su 1820-im godinama koristili jednostavnu metodu uspoređivanja dimenzija referentnog modela s dijelom koji je u procesu proizvodnje. Prikaz takvog postupka je dan slikom [17]:



Slika 7.1 – Usporedba dimenzija jednostavnom mjerkom

U sredini 19. stoljeća dogodio se strelovit rast na polju strojne obrade koja je postala sve brža i sve točnija. Njezin rast mjeriteljstvo tada više nije moglo pratiti jer je broj praćenih dimenzija na proizvodima bio sve veći i veći. Radionice su redovito imale cijele garniture različitih mjerki koje je bilo potrebno održavati. Za svaku je korištenu mjerku morala postojati i referentna mjerka prema kojoj se ona morala redovito umjeravati zbog mehaničkog trošenja koje se događalo kroz svakodnevnu upotrebu. Postojala je cijela hijerarhija umjeravanja takvih mjerki koja je prikazana slikom 7.2 [17].



Slika 7.2 – Hijerarhija sljedivosti industrijskih mjerki

Obujam proizvodnje je rastao, a tolerancijska polja pri proizvodnji bila su sve uža, te više nije bilo moguće koristiti ovakav način mjerenja koji je bio spor i neprecizan. Postojali su pokušaji uvođenja točnijih mjernih instrumenata u industriju, poput mikrometra (James Watt, 18.st.), pomične mjerke (Maudsley, 19.st.) i ponovno mikrometra (Whitworth, 1860-te.). Međutim, njihovo uvođenje nije tada bilo moguće jer su mjerne mogućnosti daleko premašivale potrebe tadašnjih tvornica [17].

Stvari su se počele mijenjati u drugoj polovici 19.st. kada je počela Druga industrijska revolucija. Proizvodi na tržištu su postajali sve kvalitetniji, izmjenjivi dijelovi su postali uobičajena praksa, tako da su prije nabrojani mjerni uređaji ušli u masovnu proizvodnju i postali lako dostupni. Koristili su se uglavnom za usporedbu glavnih mjerki i crteža proizvoda, te su i dalje mjerke bile organizirane prema prikazanog hijerarhiji.

Uz garniture raznih mjerki i sustava njihovog umjeravanja, u ranom 19. stoljeću su se koristile i referentne ploče s vrlo visokom ravnošću, tzv. ravninske ploče. Otkrio ih je Maudsley, a u upotrebu uveo Whitworth 1840 sa svojim člankom „The Mode of Producing a True Plane“ [16]. Upotrebljavale su se na način da su tri različite ploče međusobno bile uspoređivane i mehanički obrađivane dok se nije postigla izvrsna ravnost. Ovakve su ploče bile izložene mehaničkom trošenju i oštećenjima te su redovito morale biti umjeravane.

Sustav koji su činile garniture mjerki i ravninske ploče „zaokružen“ je radioničkim crtežima. Oni su u industriji zamijenili referentne modele koji su prije bili korišteni za usporedbu praćenih dimenzija. Prijelaz na radioničke crteže je bio težak jer je bilo potrebno dodatno educirati radnu snagu za koju je tada to bio veliki teret. Školstvo ih je teško prihvaćalo, a tadašnji znanstvenici su ih razvili s obzirom na svoju vrlo razvijenu

intuiciju koja je bila mnogima nepojmljiva. Naposljetku su radionički crteži bili usvojeni sredinom 19. stoljeća, ali je obrazovanje za njihovu upotrebu bilo prepušteno uglavnom industriji i tehničkim školama [17].

7.1.2 Pronalazak etalona

Jednostavnost upotrebe i točnost etalona temelji se na efektu prijanjanja. Prianjanje se događa kada se priljube dvije metalne površine koje su prije toga bile izložene vrlo finoj mehaničkoj obradi kako bi se hrapavost njihovih površina svela na minimum. Prilikom prijanjanja, površine u kontaktu drži velika sila, a zbroj duljina takvih površina je vrlo točan (razlika između stvarne duljine je ispod 1 mikrometra).

1856. Whitworth je ovaj efekt predstavio pred Institutom inženjera strojarstva Škotske, a 1875. Tyndall je opisao pokuse kojima je efekt dokazao i u vakuumu, i to sa silama čak 30 puta većima od gravitacijske [17].

Šveđanin Carl Edvard Johansson je zaslužan za uvođenje etalona u mjeriteljstvo, u obliku kakvom se i danas koriste. Bio je zaposlenik švedske tvornice pušaka Carl Gustav, kada je godine 1894. Johansson u sastavu stručne komisije otišao u njemačku tvornicu Mauser Werke. Od nje je švedska vlada naručila veliku pošiljku oružja, te otkupila licencu za njenu proizvodnju. Johansson je uočio da se u tvornici koriste granični mjerni blokovi sa točnošću 0,001 mm, te da će za proizvodnju Mauser pušaka biti potreban velik broj takvih blokova. U tvornici Mauser su slagali dva ili više bloka jedan na drugi kako bi smanjili potrebu za velikim brojem blokova, a u cilju ostvarenja pojedine mjere. Problem je bio što je točnost bila mala, a potrebni broj blokova je bio velik [2].

Johannson je 1896., već znajući za Tyndallove pokuse s poliranim metalnim pločama, prvi puta formulirao svoju ideju o korištenju malog seta mjerki koje je moguće kombinirati za dobivanje više vrsta potrebnih duljina. Na primjer, set od mjerki duljina 1 mm, 2 mm, 4 mm i 8 mm se može koristiti da bi se dobila bilo koja duljina od 1 do 15 mm. Prikaz etalona i efekta prijanjanja je dan slikom 7.3.

Prva garnitura N_o1 proizvedena je krajem 1896. godine. Garnitura je sadržavala 102 granične mjerke u mjernom području od 1 do 100 mm s gradacijom od 0,01 mm. Već 1899. godine izrađena je i prodana garnitura etalona vojnoj tvornici u Stocholmu. Godine 1904. Johansson je patentirao svoj sustav pod nazivom „Garnitura graničnih mjerki za precizna mjerenja“ pod brojem N_o 17017 [2].



Slika 7.3 – Spojeni etaloni duljine

Etalonima je uvelike smanjen broj potrebnih mjerki što ih je činilo financijski i vremenski isplativim prenosivim etalonima duljine. 1907. godine ih je u svoju proizvodnju uveo Henry Ford. U Sjedinjenim Američkim Državama su bile toliko popularne da ih je ponestalo tijekom Prvog svjetskog rata. Vlada je riješila taj problem na preporuku pronalazača William Hokea koji je predložio razvoj tehnologije za proizvodnju etalona istovjetnih Johannsonovima. Zadatak je povjeren NBS-u (National Bureau of Standards), a prvo je proizvedeno 50 garnitura etalona.

Te granične mjerke su bile cilindričnog oblika i imale su provrt u sredini mjerke. I danas se proizvode kvadratične mjerke sa provrtom u sredini te su poznate pod nazivom „Hoke blocks“ i prikazane su slikom:



Slika 7.4 – „Hoke blocks“

7.2 Normizacija etalona

U svijetu se koriste tri relevantne norme. U Europi (i međunarodno) ISO 3650, a u Americi GGG-G-15C i ANSI/ASME B89.1.9.M. Razlike su minimalne i u svom „duhu“ ove norme su jednake izuzev nekih detalja i činjenice da se u ANSI normi osim metričkog koristi i angloamerički sustav mjera [2] [17] .

7.2.1 ISO 3650

Duljina etalona je definirana kao udaljenost između ravne površine koja prijanja na jedan kraj etalona i točke mjerenja na suprotnom kraju etalona. Točka mjerenja je postavljena na sredinu površine etalona. ISO norma sadrži specifikaciju etalona isključivo s pravokutnim poprečnim presjekom i definira četiri razreda tolerancija prikazanih tablicom 7.1.

Tablica 7.1 – Razredi tolerancija ISO 3650:1998

Nominalna duljina mjerke		Tolerancije							
		Razred K		Razred 0		Razred 1		Razred 2	
Preko, mm	Do i uključno, mm	Odstupanje duljine, ±μm	Varijacija duljine, μm	Odstupanje duljine, ±μm	Varijacija duljine, μm	Odstupanje duljine, ±μm	Varijacija duljine, μm	Odstupanje duljine, ±μm	Varijacija duljine, μm
0,5	10	0,20	0,05	0,12	0,10	0,20	0,16	0,45	0,30
10	25	0,30	0,05	0,14	0,10	0,30	0,16	0,60	0,30
25	50	0,40	0,06	0,20	0,10	0,40	0,18	0,80	0,30
50	75	0,50	0,06	0,25	0,12	0,50	0,18	1,00	0,35
75	100	0,60	0,07	0,30	0,12	0,60	0,20	1,20	0,35
100	150	0,80	0,08	0,40	0,14	0,80	0,20	1,60	0,40
150	200	1,00	0,09	0,50	0,16	1,00	0,25	2,00	0,40
200	250	1,20	0,10	0,60	0,16	1,20	0,25	2,40	0,45
250	300	1,40	0,10	0,70	0,18	1,40	0,25	2,80	0,50
300	400	1,80	0,12	0,90	0,20	1,80	0,30	3,60	0,50
400	500	2,20	0,14	1,10	0,25	2,20	0,35	4,40	0,60
500	600	2,60	0,16	1,30	0,25	2,60	0,40	5,00	0,70
600	700	3,00	0,18	1,50	0,30	3,00	0,45	6,00	0,70
700	800	3,40	0,20	1,70	0,30	3,40	0,50	6,50	0,80
800	900	3,80	0,20	1,90	0,35	3,80	0,50	7,50	0,90
900	1000	4,20	0,25	2,00	0,40	4,20	0,60	8,00	1,00

Pojavom norme ISO 3650, normom se etaloni gradiraju u K klasu umjesto klase 00. Za klasu K značajno su povećana dopuštena odstupanja duljine u odnosu na klasu 00, dok su zahtjevi postavljeni na kvalitetu mjernih površina etalona ostali isti kao kod klase 00 [2].

7.3 Materijali

7.3.1 Čelik

Od njihovog samog pronalaska etaloni su bili izrađivani od čelika. Jedna od najvećih prednosti upotrebe čelika je u tome što su mnogi industrijski proizvodi, a samim time i predmeti mjerenja, načinjeni od čelika. Ako su i predmet mjerenja i etalon načinjeni od istog materijala, nije potrebno vršiti temperaturnu korekciju koja je jedan od osnovnih izvora nesigurnost rezultata mjerenja na području mjerenja duljine. Glavni problem upotrebe čelika je bila stabilnost materijala. Zbog procesa otvrdnjavanja kristalne rešetke mnogim etalonima se kroz neko vremensko razdoblje mijenjala duljina. S obzirom da se od površine traži velika tvrdoća, kristalna rešetka je martenzitna i samim time nestabilna i podložna povećanju volumena kroz duže vremensko razdoblje. U 1950-im i 1960-im godinama su vršena brojna istraživanja kako bi se riješio problem stabilnosti materijala, te je za proizvodnju etalona usvojen čelik oznake 52100 (ASTMA 295-79) odnosno XVII/I (ISO). Spomenuti čelik im utvrđenu relativnu promjenu duljine manju od $1 \cdot 10^{-6}$ kroz period od 10 godina što se pokazalo zadovoljavajućim.

Tijekom godina su istraživani i drugi materijali koji bi mogli biti korišteni pri izradi etalona, a to su bili uglavnom karbidi i kvarc [2] [17].

7.3.2 Karbidi

Karbidi su materijali s velikom tvrdoćom što znači da nisu podložni mehaničkim oštećenjima. Završna obrada ovakvih materijala može se izvesti jednako dobro kao i kod čelika, a stabilnost materijala je nešto bolja nego kod čelika. Volframov karbid ima vrlo mali koeficijent temperaturnog rastezanja (više od 3 puta manji od čelika), ali zbog visoke gustoće čini etalone razmjerno teškima. Kromov karbid ima otprilike 30% manji koeficijent temperaturnog rastezanja od čelika i otprilike je jednake gustoće kao čelik. Karbidi se često koriste u laboratorijima kao materijali za glavne etalone zbog svoje trajnosti i izdržljivosti [17].

7.3.3 Kvarc

Kvarc je materijal koji ima koeficijent temperaturnog rastezanja vrlo blizu nule. Zbog toga se često koristio kao materijal za glavne laboratorijske etalone, ali njegovi nedostaci su to što je razmjerno niske tvrdoće što ga čini podložnim mehaničkim oštećenjima i to što je zbog djelomično keramičke prirode vrlo krhak. Zbog ovih

nedostataka, ali i zbog toga što je zahtijevao velike korekcije zbog velike razlike u koeficijentima temperaturnog rastezanja, nikad nije postao previše popularan te se više ne koristi.

7.3.4 Keramika

Keramika ima vrlo dobro svojstvo prijanjanja, ali i otpornost na trošenje, koroziju, lužine, kiseline i druge agresivne medije. Može se izvesti sa širokim rasponom koeficijenata temperaturnog rastezanja pa se zbog ranije navedenih razloga etaloni izrađuju od keramike koja ima koeficijent temperaturnog rastezanja vrlo sličan čeliku. Keramika nije magnetska, te ima razmjerno malu masu, ali je zbog svoje prirode vrlo krhka.

7.4 Ravnost i paralelnost etalona

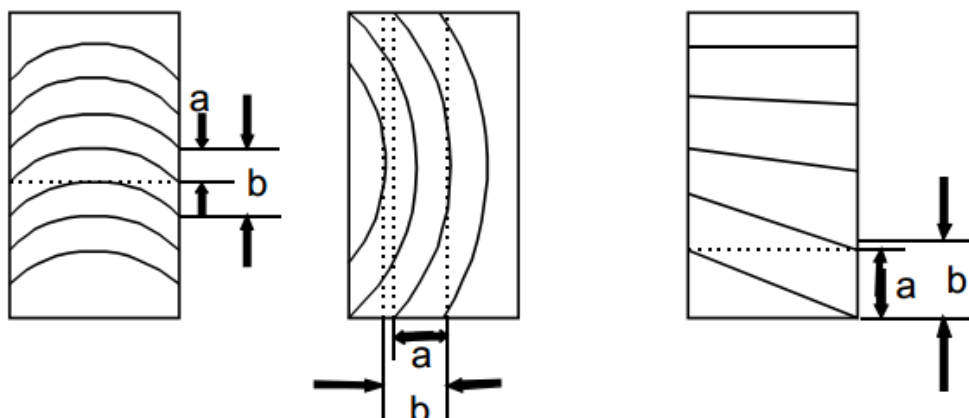
7.4.1 Mjerenje odstupanja od ravnosti

Za mjerenje ravnosti etalona koriste se razne vrste interferometara kojima se mogu promatrati razni uzorci linija interferencije. Dobivaju se monokromatskim osvjetljavanjem etalona i referentne površine poznate ravnosti. Dovoljna razina točnosti je u većini slučajeva 25 nm, tako da se često kao izvor svjetlosti koristi fluorescentna lampa s zelenim filtrom, ali je moguće koristiti i laserske izvore svjetla ako se traži veća točnost. Referentna površina mora zadovoljiti dva osnovna zahtjeva. Mora biti dovoljno velika da prekrije cijelu površinu etalona, i mora imati dovoljnu ravnost kako bi se bilo kakva zakrivljenost linija interferencija mogla pripisati nepravilnostima na površini samog etalona. U praksi su dovoljne površine promjera 70 mm i ravnosti do 25 nm.

Etaloni duljine jednaki ili veći od 2 mm mogu biti mjereni u slobodnom stanju, odnosno ne moraju u trenutku mjerenja prijanjati uz referentnu površinu. Međutim, etaloni manji od 2 mm moraju prijanjati zato što su zbog malih dimenzija podložni utjecaju savijanja. Jedna od najpopularnijih metoda mjerenja ravnosti tako malih etalona je prijanjanjem na referentnu površinu napravljenu od stakla s kvarcem visoke čistoće u amorfnoj (ne-kristalnoj) strukturi. S obzirom da je takav kvarc optički proziran, kroz njega bi se trebalo u idealnim uvjetima moći opaziti sivu boju. Svako odstupanje od te boje znači da etalon nije u dostatnoj mjeri prionuo. Kada je prijanjanje zadovoljavajuće, može se pristupiti mjerenju ravnosti suprotne (ne prionute) površine etalona.

Kod mjerenja ravnosti, linije interferencije se koriste kao pokazatelji visine površine na odgovarajućim mjestima. Točke koje leže na istoj liniji interferencije su stoga točke

površine s istim visinom. Stupanj zakrivljenosti linija interferencija je dakle pokazatelj ravnosti površine. Prikaz najčešćih vrsta linija interferencije je dan slikom:



Slika 7.5 – Linije interferencije kod mjerenja ravnosti etalona

Prema slici 7.6 odstupanje od ravnosti je izraženo kao a/b , u brojevima linija interferencije.

To znači da je u prvome slučaju odstupanje od ravnosti otprilike 0,2 linije. Taj rezultat je moguće pretvoriti u duljinu poznavajući valnu duljinu upotrijebljenog svjetla. Svaka linija predstavlja razliku između referentne površine i površine etalona u iznosu od pola valne duljine izvora svjetlosti. U ovom slučaju (zelena svjetlost) svaka linija interferencije označava 250 nm, stoga odstupanje od ravnosti u slučaju 0,2 linije iznosi 50 nm [17].

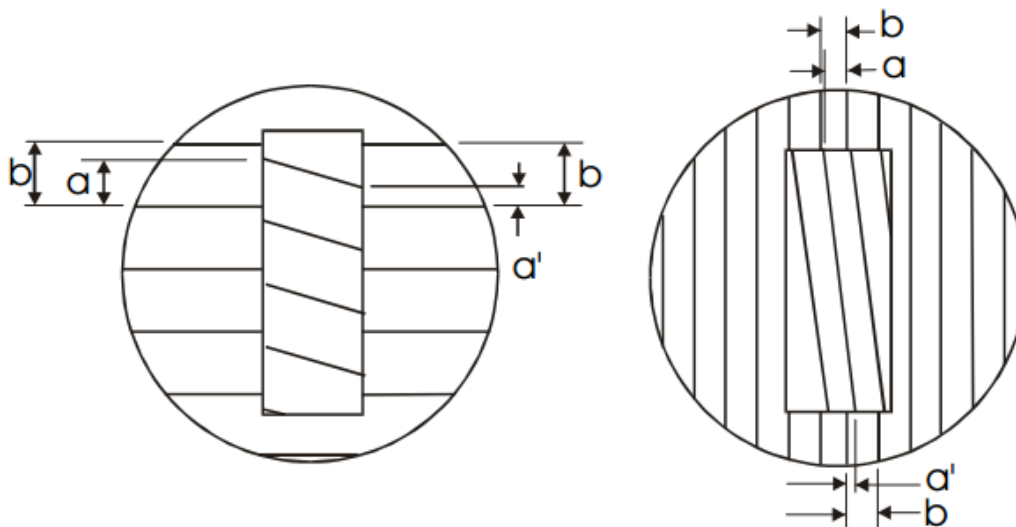
7.4.2 Mjerenje odstupanja od paralelnosti interferometrom

Odstupanje od paralelnosti se mjeri postavljanjem etalona na način da prijanjaju za pomoćnu površinu koja je napravljena od materijala velike tvrdoće, najčešće stakla ili čelika. Kao i kod mjerenja ravnosti, teži se da ta površina bude kvarcno staklo kako bi se optički moglo procijeniti koliko je dobro prijanjanje. Naime, ova metoda izravno ovisi o kvaliteti prijanjanja dvije površine te bilo kakva čestica prašine, udubina ili izvitoperenost će rezultirati krivim mjerenjem [18].

Kada se osiguralo dobro prijanjanje, iznad slobodne površine etalona postavlja se kvarcno staklo, te se promatraju linije interferencije. Kut između stakla i etalona se podešava tako da se dobije prostiranje linija interferencije cijelom širinom površine etalona, te da broj linija bude barem 4 poprijeko ili 2 uzdužno. Prikaz je dan slikom 7.7.

Odstupanje od paralelnosti je: $(a/b) - (a'/b)$.

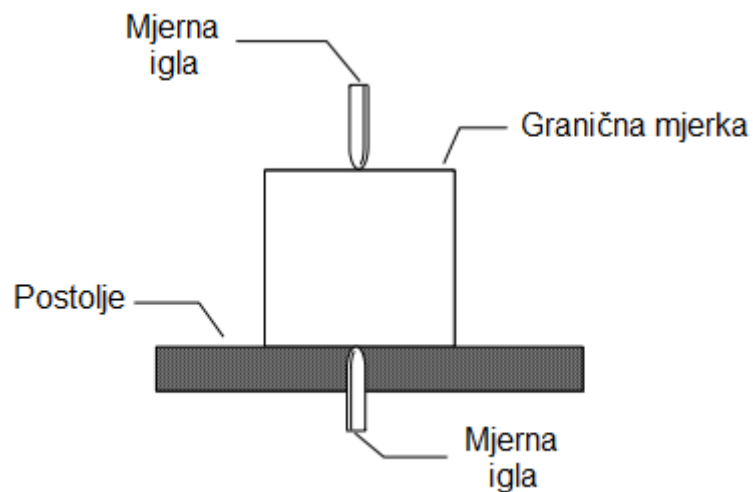
U lijevom slučaju na slici 7.7 odstupanje iznosi 0,5 linija interferencije, a preračunava se u mjerne jedinice duljine na isti način kao i kod mjerenja ravnosti (preko valne duljine izvora svjetlosti) [18].



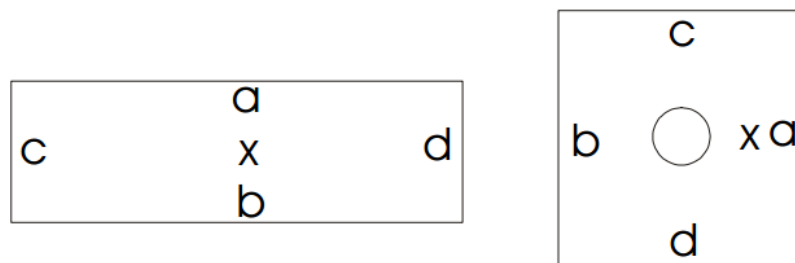
Slika 7.6 – Linije interferencije kod mjerenja paralelnosti etalona

7.4.3 Mjerenje odstupanja od paralelnosti komparatorom

Za mjerenje odstupanja od paralelnosti mogu se koristiti i elektromehanički komparatori sa mjernim iglama. Etalon se prvo postavlja u komparator i ostavlja se neko vrijeme kako bi se temperatura etalona ujednačila po čitavom volumenu. Tada se od ruba do ruba etalona (uzdužno i poprečno) mjere razlike njegove debljine. Kako bi se utjecaj temperature sveo na najmanju moguću mjeru, etalom se rukuje pomoću toplinski izoliranih hvataljki. Mjerenje komparatorom je prikazano na slici 7.8 [18].



Slika 7.7 – Mjerenje odstupanja od paralelnosti elektromehaničkim komparatorom



Slika 7.8 – Pozicije mjerenja komparatorom

Prema slici 7.9, predložena je i procedura mjerenja:

- 1) Stranu etalona koja ima oznaku „a“ treba primaknuti prema komparatorovim mjernim iglama dok gornja igla ne dođe do pozicije „a“. Tada treba očitati vrijednost i odmaknuti etalon.
- 2) Okrenuti etalon za 180° i na isti način izmjeriti položaj „b“.
- 3) Okrenuti etalon za 90° i izmjeriti položaj „c“ kao kod prethodnih koraka.
- 4) Naposljetku okrenuti etalon za 180° i izmjeriti položaj „d“

Odstupanja od paralelnosti su tada:

- Poprečno širini etalona: a-b
- Uzdužno širine etalona: c-d

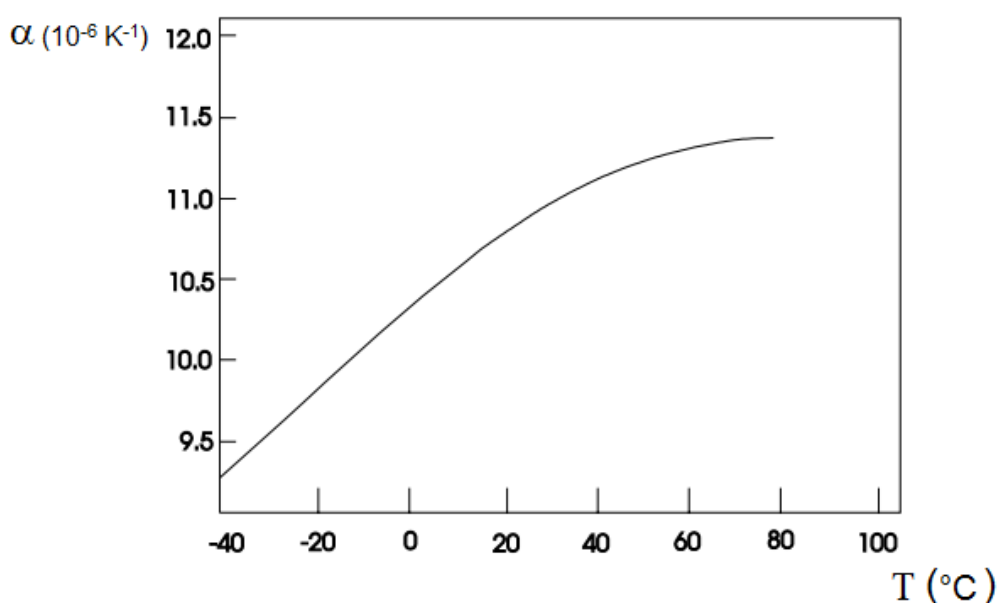
7.5 Linearni koeficijent temperaturnog rastezanja etalona

Linearni koeficijent temperaturnog rastezanja definira promjenu duljine neke dimenzije predmeta u ovisnosti o promjeni temperature, te je opisan jednačinom:

$$\frac{\Delta L}{L} = \alpha \Delta T$$

Gdje je ΔL promjena duljine, L početna duljina, α linearni koeficijent temperaturnog rastezanja, a ΔT promjena temperature.

Uz malu promjenu temperature koeficijent α se može smatrati konstantom, ali on ovisi o apsolutnoj temperaturi materijala. Dijagram ovisnosti koeficijenta α čelika za izradu etalona i apsolutne temperature prikazan je na slici 7.10.



Slika 7.9 - Dijagram ovisnosti koeficijenta α čelika za izradu etalona i apsolutne temperature

Norme ISO i ANSI iznos linearnog koeficijenta temperaturnog rastezanja čelika za etalone u rasponu od 10 °C do 30 °C određuju kao $(11,5 \pm 1,0) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Takva se karakteristika čelika pokazala vrlo problematičnom za etalone jer znači da bi promjena od samo 1 °C značila za etalon duljine 100mm - promjenu duljine od 1,15 mikrometara. Takva bi promjena duljine etalon izbacila iz onih najfinijih klasa tolerancije. Međutim, čelik se i dalje koristi za izradu etalona uglavnom zbog već spomenutog razloga da je velik broj strojnih dijelova načinjen od čelika, čime se izbjegava kompenzacija mjernih rezultata i mjerna pogreška [18].

7.6 Prionjivost

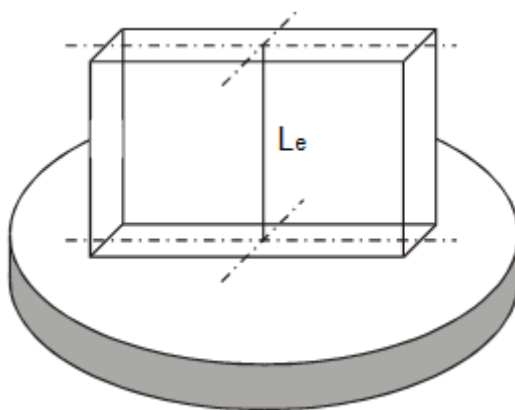
Prionjivost je glavna karakteristika etalona. Prianjanjem dvije površine se može dobiti nova površina željene duljine s iznimno malom nesigurnošću. Međutim, prionjivost sa sobom nosi i određena ograničenja.

Materijal mora imati stabilnu površinu velike tvrdoće što je na početku izbor materijala ograničilo na kaljeni čelik i keramiku. Aluminiij, na primjer, zbog svog sloja oksida ne može prianjati za drugu površinu. Na početku 20. stoljeća to nije bio problem jer su skoro svi strojni dijelovi bili načinjeni od čelika, ali danas je varijacija materijala mnogo veća. Ta činjenica, zajedno sa sve užim tolerancijama čini upotrebu etalona sve težim [17].

7.7 Duljina

Definicija duljine etalona je jedinstvena među svim drugim mjerkama jer sadrži i efekt prianjanja. Sloj prianjanja je dodan u definiciju duljine jer je činjenica da nijedan etalon nema savršeno ravnu površinu, ali je time i riješen problem slaganja etalona u kombinacije jer nije potrebno posebno taj sloj uzimati u obzir.

Prema dogovoru, duljina etalona L_e u nekoj točki definirana je kao okomita udaljenost između te točke i ravne površine mjerne podloge izrađene od istog materijala i iste kvalitete površine na koju je prionula druga mjerna površina etalona. Ova definicija se odnosi na primjenu interferometrijske metode mjerenja.



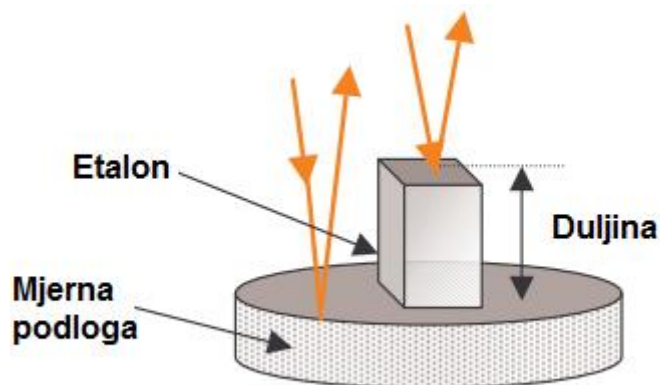
Slika 7.10 – Duljina etalona

Mjerna podloga se u definiciji duljine koristi kako bi se riješio problem korekcije pomaka u fazi koji se javlja kod optičkih mjerenja kao posljedica refleksije na različitim materijalima s različitim kvalitetama mjernih površina. Iako se na prvi pogled čini da su ovakvom definicijom eliminirani utjecaji sistematskih pogrešaka, pokazalo se u praksi da

je upravo ovakva definicija duljine glavni izvor mjerne nesigurnosti u postupku umjeravanja etalona.

7.8 Interferometrijska metoda mjerenja duljine etalona

Interferometri opisani u prethodnim poglavljima se koriste u lancu sljedivosti za precizno prenošenje jedinice duljine na etalone, odnosno njihovo umjeravanje.



Slika 7.11 – Refleksija svjetlosti s površine etalona i podloge

Prema slici 7.12, optička udaljenost između dvaju reflektiranih snopova je jednaka dvostrukoj duljini etalona:

$$2L = N\lambda$$

Gdje je:

$2L$ – dvostruka duljina

N – broj valova koji je potreban da bi se „popunila“ cijela duljina etalona

λ – valna duljina svjetlosti

Ako je etalon duljine 100 mm, tada za:

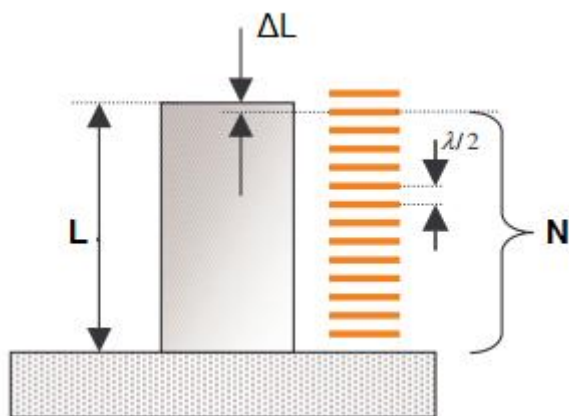
$$\lambda = 633 \text{ nm} \rightarrow N = 315\,955,796$$

što znači da broj linija interferencije nije cijeli broj već da ima svoj ostatak.

L se tako može izraziti kao:

$$L = (N + f) \frac{\lambda}{2}$$

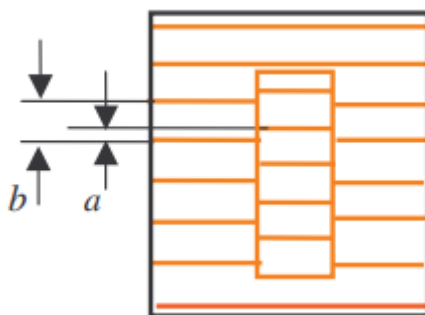
Gdje je jedina razlika varijabla f koja označava ostatak pruga interferencije ($0 < f < 1$).



Slika 7.12 – Duljina etalona opisana kao broj linija interferencije

Na slici 7.13, ΔL odgovara frakciji ($f \frac{\lambda}{2}$).

Kao što je već spomenuto, frakcija linije interferencije se može zapisati i kao a/b gdje b odgovara udaljenosti između dvije susjedne linije, a a odgovara udaljenosti frakcije od linije. Podrobnije je prikazano slikom 7.14.



Slika 7.13 – Vrijednosti a i b prilikom „brojanja“ linija interferencije

Ovakvim interferogramom naravno nije moguće odrediti duljinu etalona, pa se za to koristi tehnika „više valnih duljina“.

Mjeri se s više različitih izvora svjetlosti (lasera) pa se tako za etalon od 100 mm može iz prethodnih izraza dobiti:

$$\lambda_1 = 633 \text{ nm} \rightarrow F_1 \approx 0,766$$

$$\lambda_2 = 612 \text{ nm} \rightarrow F_2 \approx 0,386$$

$$\lambda_3 = 543 \text{ nm} \rightarrow F_3 \approx 0,125$$

Za navedene frakcije matematički se može pronaći samo jedan pravi L čiji će iznos vrlo blizu očekivane nominalne vrijednosti (u ovom slučaju 100 mm). Stoga, L se može odrediti analizom frakcija. Takva metoda se naziva „metodom točnih razlomaka“.

Metoda je opisana općenitom jednadžbom:

$$L = m_1 \frac{\lambda_1}{2} = m_2 \frac{\lambda_2}{2} = \dots = m_i \frac{\lambda_i}{2}$$

Gdje su m_i redovi interferencije s cjelobrojnou vrijednošću i frakcijom.

Do rješenja općenite jednadžbe dolazi se poznavanjem vrijednosti valne duljine korištenih izvora svjetlosti. Tražena duljina L se dobije rješavanjem seta homogenih jednadžbi, ali čak i da je mjerenje linija interferencije bilo savršeno – doći će do pojave brojnih potencijalnih rješenja. Štoviše, neka rješenja će se ponavljati u intervalima koji ovise o korištenoj svjetlosti i njenoj valnoj duljini.

Tijekom rješavanja jednadžbi dolazi do pojave više izglednih rješenja koja se kreću oko nominalne vrijednosti etalona. Pojavljuju se zbog toga što je funkcija iznimno osjetljiva na eventualan šum ili nesavršenost u mjernom postupku, ali samo jedno od tih rješenja je pravo.

Najčešće se postupa tako da se pregledaju sve potencijalne vrijednosti čiji je iznos blizu iznosa nominalne duljine i nakon toga se odabere onaj iznos koji se najbolje „slaže“ s izmjerenim iznosom frakcije interferencije. Za sustav s 5 različitih izvora svjetlosti vrijednost duljine L etalona je moguće dobiti s očekivanom točnošću od $\pm 10 \mu\text{m}$.

Matematičke operacije uobičajeno izvodi računalni regresijski softver kojim je moguće i provjeriti one etalone koji su možda greškom označeni da imaju viši razred točnosti nego što je to stvarno slučaj jer će algoritam tada odabrati alarmantnu vrijednost za L . Tada jedino preostaje napraviti grubu provjeru duljine s drugim mjernim uređajem, npr. mikrometrom.

7.8.1 Korekcije mjerenja

Prvo se pristupa mjerenju frakcija linija interferencije za svaku od korištenih valnih duljina λ_i . Viškovi izmjerenih frakcija interferencije F_{λ_i} koji predstavljaju odstupanje od nominalne duljine korigirani su zbog utjecaja indeksa loma zraka i izračunavaju se iz izmjerenih frakcija interferencije. Računalni algoritam tada započinje s testnom duljinom odabranom na osnovu viškova frakcija izmjerenih za referentnu valnu duljinu i u koracima podiže redove interferencije referentne valne duljine K_r tražeći minimum od $(F_{\lambda_i} - \hat{F}_{\lambda_i})$ prolaskom kroz sve valne duljine korištene za mjerenje. Na svakoj testnoj

duljini, računa se ostatak $(F_{\lambda_i} - \hat{F}_{\lambda_i})$ gdje je F_{λ_i} mjereni višak frakcije, a \hat{F}_{λ_i} višak frakcije na testnoj duljini.

Odstupanje od nominalne duljine poprima tada oblik:

$$d = F_{\lambda_r} \frac{\lambda_r}{2} + K_r \frac{\lambda_r}{2} + \left(\frac{\sum_i (F_{\lambda_i} - \hat{F}_{\lambda_i})}{n} \right) \frac{\lambda_r}{2}$$

gdje je $F_{\lambda_r} \frac{\lambda_r}{2}$ ekvivalent duljine viška frakcije referentne valne duljine, $K_r \frac{\lambda_r}{2}$ ekvivalent broja redova interferencije koje je softver prošao, a $\left(\frac{\sum_i (F_{\lambda_i} - \hat{F}_{\lambda_i})}{n} \right)$ je srednja vrijednost ostataka za n upotrijebljenih valnih duljina.

Kada se izraze i ostali faktori koji utječu na mjerenje, ukupna devijacija D se može napisati kao:

$$D = d + (20 - t_E) \alpha L + \phi + \Omega L$$

gdje je ΩL odstupanje od oblika, ϕ je korekcija zbog pomaka u fazi, t_E temperatura etalona tijekom mjerenja, a α je koeficijent temperaturnog rastezanja materijala etalona.

7.8.2 Mjerna nesigurnost

Nesigurnost mjernog rezultata odražava pomanjkanje točnog znanja vrijednosti mjerene veličine. Mjerni rezultat je i nakon ispravka utvrđenih sustavnih djelovanja zbog nesigurnosti koja potječe od slučajnih djelovanja i nesavršenosti ispravka rezultata zbog sustavnih djelovanja još uvijek samo procjena vrijednosti mjerene veličine [21]. Tako je mjerna nesigurnost jednostavan i univerzalan iskaz o kvaliteti mjernog rezultata i procjena raspona vrijednosti unutar kojega očekujemo da se nalazi prava vrijednost mjerene veličine.

Primjer mjerne nesigurnosti mjerenja etalona interferencijskom metodom je prikazan tablicom na slijedećoj stranici [20].

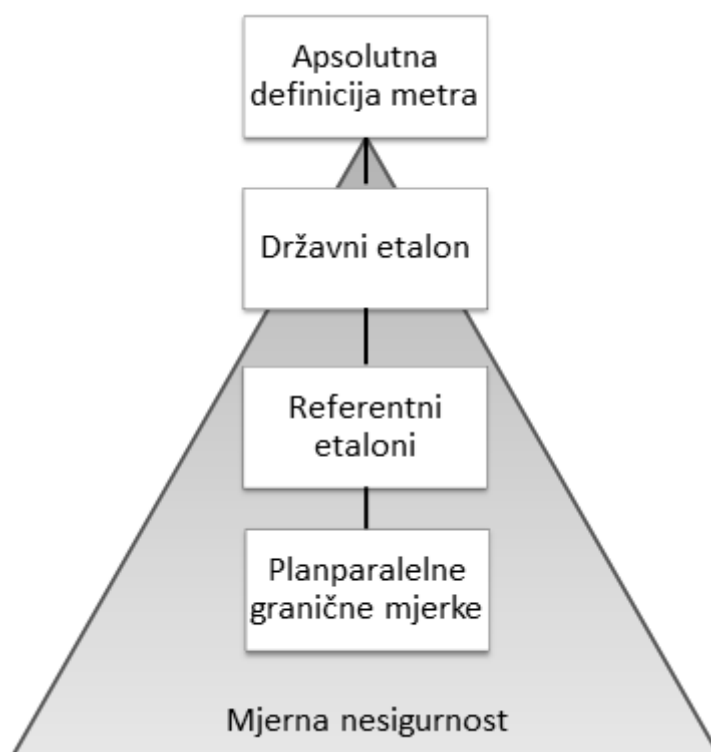
Tablica 7.2 – Primjer mjerne nesigurnosti mjerenja interferometrom

Utjecajni faktor x_i	Standardna fizikalna nesigurnost $u(x_i)$	Doprinos nesigurnosti duljini, nm $c_{x_i}u(x_i)$
Mjerenje frakcija	0,004 linije	1,4
Prianjanje	6 nm	6
Pomak u fazi	6 nm	6
Ravnost i paralelnost etalona	2 nm	2
Optika interferometra:		
Pogreške valnih fronti	3 nm	3
Pogreške oblika:		
Veličina izvora	5 μm	0,002L
Poravnanje	50 μm	0,008L
He-Ne laser:		
Drift kroz period od jedne godine	0,000001%	0,005L
Kalibracija	0,0000002%	0,001L
Valna duljina korištene lampe	0,000002%	0,0002L
Koeficijent temperaturnog rastezanja (čelik)	0.00007% / K	0,033L
Temperatura etalona:		
Kalibracija senzora	2,5 mK	0,029L
Temperaturni gradijent etalona	5 mK	0,058L
Sposobnost očitavanja	0,1 mK	0,001L
Smetnja kod očitavanja	0,004L	
Indeks loma zraka:		
Edlenova jednadžba	0,000001%	0,010L
Tlak zraka:		
Kalibracija	50 Pa	0,135L
Sposobnost očitavanja	4 Pa	0,011L
Drift	54 Pa	0,146L
Temperatura zraka:		
Kalibracija	2,5 mK	0,004L
Sposobnost očitavanja	0,1 mK	0,0001L
Drift	1 mK	0,001L
Vlažnost zraka:		
Točnost	1,2%	0,010L
Sposobnost očitavanja	0,1%	0,001L
Drift	1%	0,009L
Kvadratni zbroj	$9,3^2 + 0,21^2 L^2 \text{ nm}^2$	
Linearno proširena nesigurnost	19 + 0,28L nm	

7.9 Sljedivost

Sljedivost je svojstvo mjernog rezultata ili vrijednosti po kojemu se on može dovesti u vezu s referentnim etalonima (obično državnim ili međunarodnim) neprekinutim lancem usporedaba koje imaju utvrđene mjerne nesigurnosti.

Mjerenjem etalona upotrebom primarnog standarda duljine, tj. jedno stabiliziranog He-Ne lasera etalon se dovodi u direktnu vezu s njim. Dalje se etalon može koristiti za umjeravanje i provjeru druge mjeriteljske opreme za mjerenje duljine koja je u hijerarhiji ispod njega, tj. ima veću iskazanu mjernu nesigurnost. Ovaj hijerarhijski sustav predstavlja sljedivost pomoću koje se teoretski svaka mjera duljine može dovesti u vezu s apsolutnom definicijom metra. Položaj etalona planparalelnih graničnih mjerki u toj hijerarhiji je prikazan slikom:



Slika 7.14 – Piramida sljedivosti

U piramidi su vidljivi i referentni etaloni koji su umjereni pomoću državnog etalona. Kako se spušta niz piramidu, broj potrebnih mjerenja koje određeni uređaj na ovoj piramidi mora obaviti raste, te je stoga puno praktičnije umjeriti referentne etalone (interferometre) i njih koristiti za daljnje umjeravanje.

7.10 Zaključno o etalonima

Planparalelne granične mjerke su ispunile svoju zadaću kao etalon duljine i ostale su upotrebi puno duže nego što se od njih očekivalo. S obzirom na današnje iznimno točne metode mjerenja, stvara se dojam da graničnim mjerkama s njihovim mnogim nedostacima i ograničenjima možda više nije mjesto u upotrebi u kakvoj su bili. Bez obzira na to, za njih ima mjesta u mjeriteljstvu jer stare mjeriteljske tehnologije nikad u potpunosti ne nestaju.

8 MJERITELJSKA INFRASTRUKTURA U REPUBLICI HRVATSKOJ

Državna mjeriteljska infrastruktura bitan je element svakog industrijaliziranog gospodarstva. Ona osigurava temelj za aktivnosti na istraživanju i razvoju. Iako se na prvi pogled mjeriteljska infrastruktura ne čini previše bitnom, bez nje bi očuvanje kvalitete svakodnevnog života u Hrvatskoj bio nemoguć jer je ona direktno odgovorna za preciznost u izradu konstrukcija, ispitivanja okoliša (npr. pitke vode i mora), osiguravanju sljedivosti i dr. Cijela infrastruktura postaje ključna za premošćivanje tehničkih zapreka u globalnoj trgovini, kao i za usuglašavanje s zakonima Europske Unije čija će članica uskoro postati i Hrvatska.

U mjeriteljskom sustavu Republike Hrvatske djeluju slijedeći najvažniji sudionici:

- Državni zavod za mjeriteljstvo (DZM)
- velik broj znanstvenih i industrijskih laboratorija
- nacionalne istraživačke ustanove
- nevladine organizacije (CROLAB, Hrvatsko mjeriteljsko društvo, i dr.)

Ovakav sustav se naziva distribuiranim sustavom jer je dio zadaća i odgovornosti za određene aspekte na državnoj razini prenesen i na laboratorije izvan DZM-a.

8.1 Sastavnice mjeriteljskog sustava Republike Hrvatske

8.1.1 *Državni zavod za mjeriteljstvo*

Državni zavod za mjeriteljstvo je državna upravna organizacija zadužena za obavljanje mjeriteljskih djelatnosti u skladu s odredbama Zakona o mjeriteljstvu. Najvažnije aktivnosti koje on obavlja su donošenje mjeriteljskih propisa, provedba mjeriteljskog nadzora, obavljanje mjeriteljskih aktivnosti, te zastupanje Republike Hrvatske u međunarodnim mjeriteljskim organizacijama. DZM je odgovoran za proglašavanje državnih etalona i za davanje ovlasti nacionalnim laboratorijima nositeljima etalona i pravnim osobama koje djeluju u području primjene zakonskog mjeriteljstva, te usklađuje i nadzire njihove aktivnosti. DZM je član OIML-a (Međunarodne organizacije za zakonsko mjeriteljstvo), EUROMET-a (Suradnja između nacionalnih mjeriteljskih instituta u Europi i Europskog povjerenstva), i pridruženi je član CGPM-a i WELMEC-a (Europska suradnja u području zakonskog mjeriteljstva). DZM je potpisnik CIPM MRA (Sporazum o međusobnom priznavanju za nacionalne mjerne etalone i za potvrde o umjeravanju i mjerenju koje izdaju državni mjeriteljski instituti). Od 2010. godine i

uspostavljanja Hrvatskog mjeriteljskog instituta, većinu zadaća DZM je preuzeo taj institut.

8.1.2 Laboratoriji nositelji državnih etalona

Ovi su laboratoriji bitna sastavnica sustava jer ostvaruju, čuvaju i održavaju državne etalone te osiguravaju mjernu sljedivost na najvišoj razini u zemlji. Svi državni laboratoriji imaju međunarodnu akreditaciju za odgovarajuća područja i opseg svoga djelovanja. Na temelju postojeće EUROMET-ove razredbe (koja uključuje deset definiranih mjeriteljskih područja) nacionalne umjerne sposobnosti uspostavljene su u četiri mjeriteljska područja a to su: duljina, masa i srodne veličine, elektricitet i termometrija, dok je u tijeku postupak uspostavljanja odgovarajućih umjernih sposobnosti u području ionizacijskog zračenja te akustike i vibracija.

8.1.3 Hrvatska akreditacijska agencije (HAA)

HAA je javna ustanova osnovana temeljem Zakona o akreditaciji, a započela je sa samostalnim radom 1. srpnja 2005. godine. Punopravna je članica EA (Europske suradnje na akreditaciji).

HAA i mreža akreditiranih tijela predstavljaju osnovu za provedbu tehničkog zakonodavstva, ocjenu sukladnosti proizvoda, procjenu stanja zaštite okoliša, zdravlja i potrošača te osigurava provedbu nadzora nad tržištem u Republici Hrvatskoj

Bavi se poslovima akreditacije ispitnih i umjernih laboratorija, te vrši nadzor nad radom akreditiranih laboratorija i tijela za ocjenu sukladnosti.

8.1.4 Hrvatski zavod za norme (HZN)

HZN je nacionalno normirno tijelo republike hrvatske koje je započelo s radom istovremeno kada i HAA. HZN predstavlja Republiku Hrvatsku u međunarodnim organizacijama za normizaciju ISO i IEC kao punopravni član, u Europskom institutu za telekomunikacijske norme ETSI u statusu državnog normirnog tijela, a u europskim organizacijama za normizaciju CEN (europski odbor za standardizaciju) i CENELEC (europski odbor za elektrotehničku standardizaciju) kao pridruženi član.

Sudjeluje u osnivanju i koordinaciji savjetodavnih i tehničkih tijela, te služi kao podrška provedbi tehničkog zakonodavstva. Priprema, prihvaća, uređuje i izdaje hrvatske norme te vrši izobrazbu na području normizacije i srodnih djelatnosti.

8.1.5 Ostali

Udruga nacionalnih mjeriteljskih, ispitnih i analitičkih laboratorija CROLAB (Hrvatski laboratoriji) je osnovana 2003. godine kao pravna osoba i neprofitna organizacija s ciljem udruživanja laboratorija radi unapređivanja sustava kvalitete svakog pojedinog laboratorija. Broji više od 100 laboratorija članova, te je član EUROLAB-a i EUROCHEM-a.

Hrvatsko mjeriteljsko društvo (HMD) i KoREMA su dragovoljne i neprofitne nevladine udruge koje promiču mjeriteljstvo na državnoj i međunarodnoj razini. KoREMA je član Međunarodne mjeriteljske konfederacije (IMEKO) u čijim tehničkim odborima i aktivnostima sudjeluju i hrvatski predstavnici.

Tablica 8.1 – Nositelji nacionalnih etalona u Republici Hrvatskoj

Naziv laboratorija	Državni etalon
Laboratorij za precizna mjerenja dužina, Fakultet strojarstva i brodogradnje	Duljina
Laboratorij za procesna mjerenja, Fakultet strojarstva i brodogradnje	Temperatura Tlak
Laboratorij za materijale, Fakultet strojarstva i brodogradnje	Sila
Laboratorij za masu, Hrvatski mjeriteljski institut	Masa
Laboratorij za gustoću, Hrvatski mjeriteljski institut	Gustoća
Primarni elektromagnetski laboratorij, Fakultet elektrotehnike i računarstva	Napon Otpor Kapacitet

Etaloni koji se koriste za ovjeravanje mjerila moraju biti umjereni, i njihovo umjeravanje se obavlja uspoređivanjem etalona s etalom veće mjeriteljske kakvoće. Prava vrijednost fizikalne veličine prenosi se s međunarodnog etalona na primarni etalon, s primarnog na sekundarni pa sve do krajnjih korisnika. Takvim lančanim uspoređivanjem se ujedno osigurava sljedivost.

Kad u Republici Hrvatskoj ne postoji mogućnost umjeravanja etalona, umjeravanje se mora obaviti u stranom laboratoriju ovlaštenim od institucije koja je u toj državi ovlašten za zakonsko mjeriteljstvo.

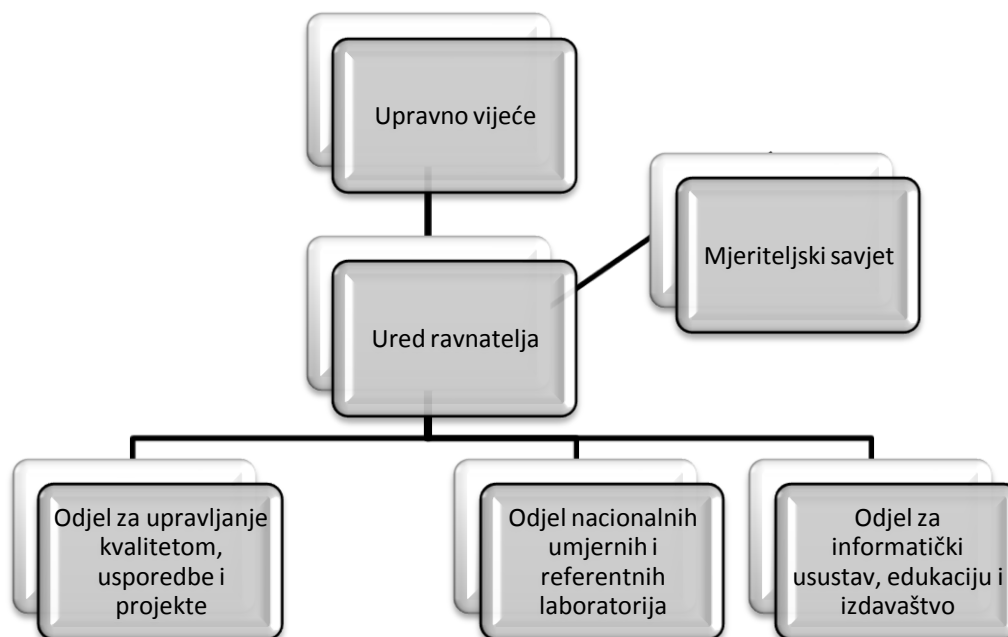
8.1.6 Hrvatski mjeriteljski institut (HMI) [21]

HMI je ustanova koja osigurava mjernu sljedivost i bavi se istraživanjem, razvojem i održavanjem mjeriteljskih etalona na najvišoj razini u Republici Hrvatskoj. Osnovan je 2010. godine i djeluje pod Ministarstvom znanosti, obrazovanja i sporta. Vizija HMI-a je da kao efikasan i međunarodno priznat nacionalni mjeriteljski institut pokriva mjeriteljske potrebe na područjima od strateškog interesa u RH.

HMI zadovoljava kriterije i član je EURAMET-a, te HMI u Generalnoj skupštini EURAMET-a zastupa njegov ravnatelj. HMI predstavlja Republiku Hrvatsku kao potpisnicu i punopravnu članicu Dogovora o metru. HMI je potpisnik Sporazuma o međusobnom priznavanju (CIPM-MRA), te time ostvaruje globalno priznanje svojih etalona i brojnih umjernih mogućnosti koji su položeni u Bazi podataka ključnih usporedbi. Svi nacionalni umjerni laboratoriji HMI-ja registrirani su kod BIPM-a, te HMI aktivno sudjeluje u njegovom radu. HMI predstavlja RH i aktivno sudjeluje u radu Opće konferencije za mjere i utege (CGPM). Na taj način su umjernice koje HMI izdaje preko CIPM-MRA globalno priznate i omogućuju RH međunarodno priznanje svih djelatnosti ili proizvoda koji se na njima temelje ili se njima koriste. Od jeseni 2012. godine, HMI je putem svojeg nacionalnog etalona za temperaturu postao pridruženi član (promatrač) u Konzultativnom odboru za temperaturu CIPM-a, što je obvezatni korak ka punom članstvu u koje se može ući tek nakon dvije godine.

Ustrojstvo HMI-ja se temelji na raspodijeljenome konceptu koji podrazumijeva uštede u zapošljavanju, osigurava vrhunske stručnjake i znanstvenu djelatnost koristeći se postojećim znanstvenicima i laboratorijima.

Organizacijska struktura HMI-ja je prikazana slikom 8.1. Upravno vijeće se sastoji od pet članova, a Odjel nacionalnih umjernih i referentnih laboratorija sastoji se od laboratorija već navedenih tablicom 8.1, uz dodatak Sekundarnog standardnog dozimetrijskog laboratorija. Ugovori između tih Nacionalnih umjernih laboratorija (NUL-ova) i HMI-ja opisuju uzajamne obveze, a sredstva koje NUL-ovi dobivaju su strogo namjenska i odnose se samo na umjeravanje i održavanje etalona, akreditaciju i zastupanje u tehničkim odborima EURAMET-a.



Slika 8.1 – Ustroj HMI-a

Osim osiguravanja sljedivosti mjerenja u Republici Hrvatskoj i provođenja umjeravanja etalona i mjerila, djelatnost HMI-ja obuhvaća i:

- proglašavanje državnih etalona, obavljanje upravnih i stručnih poslova u vezi s državnim etalonima i usklađivanje rada nacionalnih umjernih laboratorija
- planiranje, organiziranje, koordiniranje i provođenje poslova razvoja nacionalnog sustava temeljnog mjeriteljstva
- ostvarivanje, čuvanje i održavanje državnih mjernih etalona i osiguravanje njihove sljedivosti prema međunarodnim etalonima
- obavljanje poslova istraživanja i razvoja u području temeljnog mjeriteljstva
- obavljanje poslova nacionalnih umjernih laboratorija koji se prema potrebi uspostavljaju u sklopu HMI-ja
- usklađivanje i nadzor nad nacionalnim umjernim laboratorijima izvan HMI-ja
- predstavljanje Republike Hrvatske u međunarodnim mjeriteljskim organizacijama za temeljno mjeriteljstvo i osiguravanje izvršenja zadaća koje proizlaze iz članstva u tim organizacijama
- obavljanje drugih poslova u skladu s Uredbom o osnivanju HMI-ja

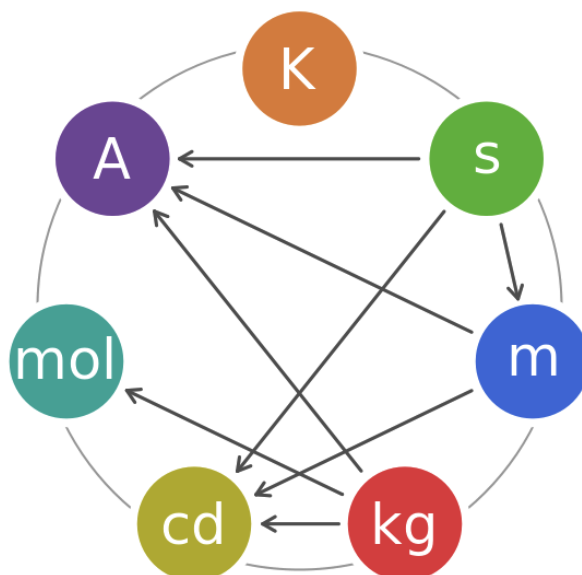
Osim znanstvenoistraživačkog rada Laboratoriji unutar HMI-ja izravna su podrška hrvatskom gospodarstvu, HAA i DZM. U laboratorijima HMI-ja godišnje se provede oko 3000 umjeravanja za potrebe gospodarstva i na taj način se prenosi mjerna sljedivost na etalone niže razine u akreditiranim umjernim i ispitnim laboratorijima, znanstvenim

ustanovama i industriji. Gotovo da i nema djelatnosti u RH do koje ta mjerna sljedivost ne dopire. Za potrebe HAA djelatnici laboratorija HMI-ja djeluju kao eksperti ili stručni ocjenitelji.

Svi HMI-jevi laboratoriji neprekidno sudjeluju u međunarodnim usporedbenim mjerenjima koje organizira EURAMET. Sve nacionalne umjerne laboratorije HMI-ja (prije nego što su to postali) je prema normi HRN EN ISO/IEC 17025 akreditirala Njemačka umjerna služba DKD (kasnije DakkS).

8.2 Realizacija osnovnih SI jedinica u Republici Hrvatskoj

Osnovne SI jedinice duljine, mase, temperature i vremena se u Republici Hrvatskoj realiziraju u već spomenutim umjernim i referentnim laboratorijima. Osnovne SI jedinice i njihova međusobna ovisnost je prikazana slikom:



Slika 8.2 – Ovisnost SI jedinica

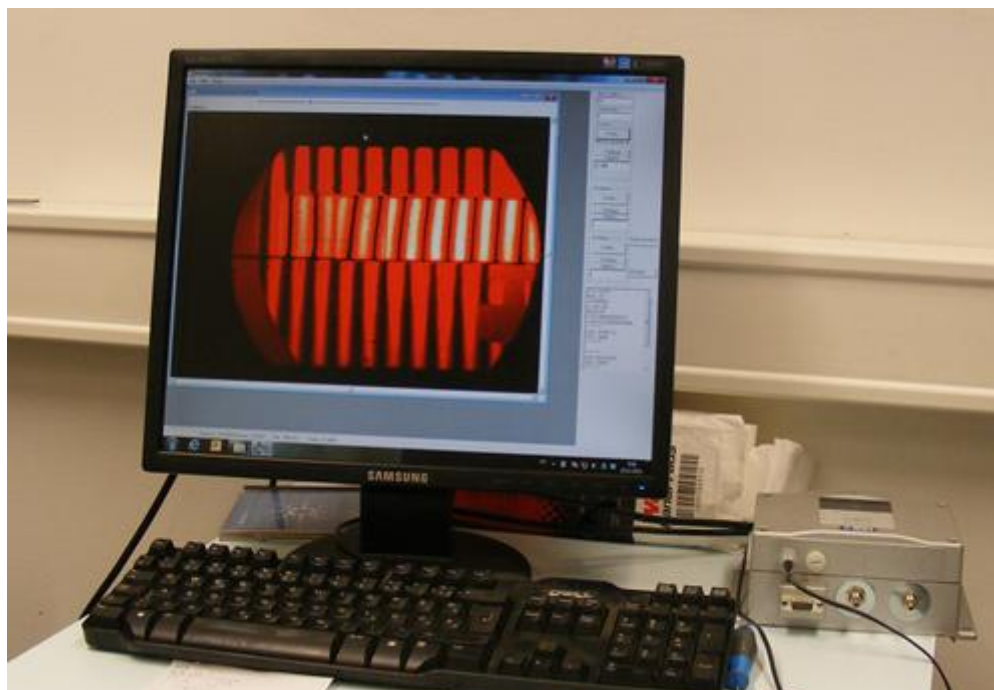
8.2.1 Realizacija definicije metra

Laboratorij za precizna mjerenja dužina (LPCM) Fakulteta strojarstva i brodogradnje je nositelj nacionalnog etalona duljine i hrapavosti. Od 2003. godine posjeduje NPL jedno stabiliziran HeNe laser i sustav za usporedbu frekvencija.

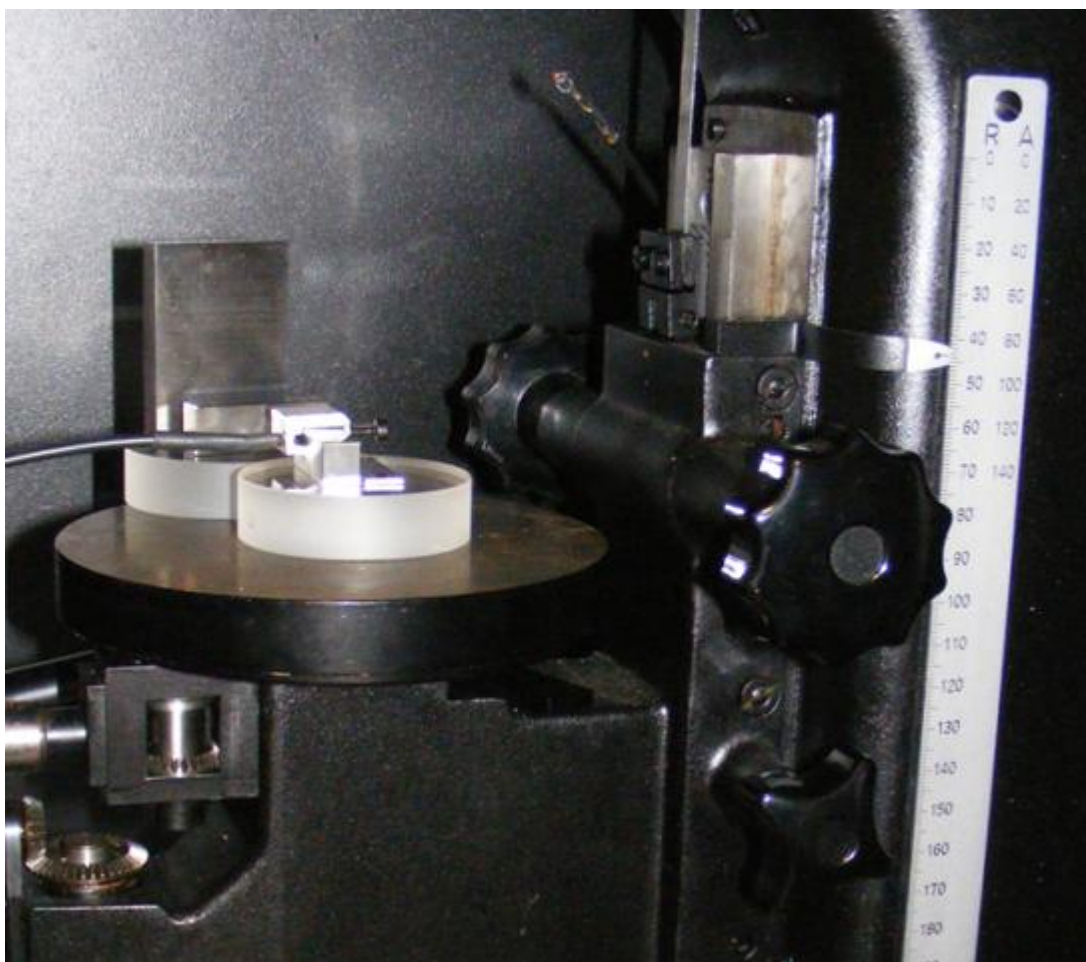
Primarnim etalomom duljine se osigurava sljedivost u postupku apsolutnog mjerenja planparalelnih graničnih mjerki na način koji je opisan poglavljem 7.8.



Slika 8.3 – Interferometar u LPCM



Slika 8.4 – Računalni prikaz mjerenja pruga interferencije u LPCM



Slika 8.5 – Unutrašnjost interferometra pri apsolutnom umjeravanju planparalelnih graničnih mjerki

Product
Serial number
Date of calibration

ML10 laser
G36593
16th April 2012

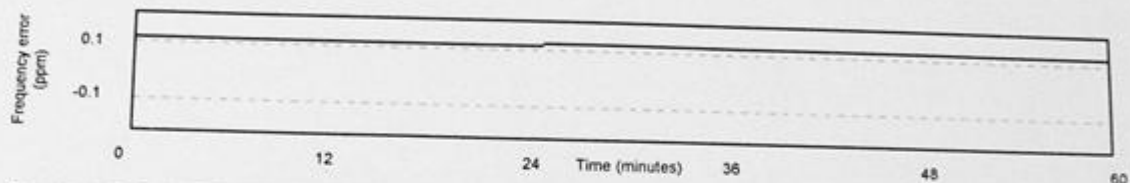
RENISHAW
apply innovation™

Calibration certificate

Specification

Vacuum wavelength 0.6329905770 $\mu\text{m} \pm 0.1 \text{ ppm}$
Equivalent frequency 473612829.2 MHz

Measured values and uncertainties of calibration



Results	Value (MHz)	Value (ppm)
Laser frequency:	473612887.7	-
Laser frequency error:	58.5	0.124
Stability (peak-to-peak):	3.1	0.007
Maximum laser frequency error:	60.1	0.127
Uncertainty of measurement (k=2):	± 5.9	± 0.01

Reference standards	Ref. no.	Lab	Certificate no.	Calibration date
Iodine stabilised HeNe laser	MTE/A197	NPL	2010080175-LL03	18 th August 2010
Frequency counter	MTE/A161	Calserv	28048	12 th December 2011
Reference HeNe laser	GOLDSTD11	Renishaw	H51280-120313-00	13 th March 2012
Test procedure	PT-50244			

Laser measurement system accuracy: Based on this calibration, when this ML10 laser is used with a Renishaw EC10 compensator and a Renishaw air temperature sensor (*both within specification*) the laser measurement system accuracy (k=2) in linear measurement mode will be within: $\pm 1.1 \text{ ppm}$ (see the system manual for details).

Authorised signature	Signatory	Position	Issue date
	W. Lee	Divisional Director	18 th April 2012

This certificate may not be reproduced other than in full, except with the prior written approval of:

Renishaw plc
Laser & Calibration Products Division
Bath Road, Woodchester
Stroud
Gloucestershire
GL5 5EY
United Kingdom
Tel +44 (0) 1453 524524

Certificate number
G36593-120416-00

L-9908-0888/04

www.renishaw.com

Page 1 of 2

Slika 8.6 – Certifikat kalibracije lasera LPCM



Certificate of Calibration

NPL
633-nm IODINE-STABILIZED LASER

FOR: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture,
University of Zagreb,
Ivana Lučića 5,
10000 Zagreb, Croatia
For the attention of Prof V Mudronja.

IDENTIFICATION: NPL iodine-stabilized 633-nm HeNe laser, S.N. R19, including REO
Brewster-windowed plasma tube S.N. 11449-2908-09, NPL iodine
cell 7b and associated control electronics.

DATE
OF CALIBRATION: 10 February 2009.

BASIS OF TEST: Determination of the laser frequency by comparison with an NPL
iodine stabilized reference laser.
The uncertainties quoted in this certificate are for a confidence level
of 95%, unless otherwise stated.

Reference: LL0301/0901

Page 1 of 2

Date of issue: 11 February 2009

Signed:

Authorised Signatory

Checked by: CSE

Name:

G. P. Barwood

for Managing Director

This certificate provides traceability of measurement to recognised national standards, and to the units of measurement realised at the NPL or other recognised national standards laboratories. This certificate may not be reproduced other than in full, unless permission for the publication of an approved extract has been obtained in writing from the Managing Director. It does not of itself impute to the subject of calibration any attributes beyond those shown by the data contained herein.

NPL-CJ4-99/11

Slika 8.7 – Certifikat primarnog etalona lasera LPCM 1/2

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY

Continuation Sheet

MEASUREMENTS

The NPL reference laser was a helium neon laser emitting at 474 THz, and stabilized by intra-cavity saturated absorption to hyperfine components of the 11-5 R(127) transition of $^{127}\text{I}_2$. This reference laser is designed and operated in accordance with the 2001 recommendations of the International Committee for Weights and Measures for the practical realisation of the metre. The emitted frequency of this laser is thus known within the 2.1 parts in 10^{11} relative standard uncertainty (corresponding to ± 10 kHz at a 68% confidence level) specified by the International Committee for Weights and Measures.

The light from the iodine-stabilized laser under test was superimposed by a semi-reflector with light from the NPL reference laser and the beat was detected with an avalanche photodiode. Each frequency measurement was made using a counter with a 20 s averaging time.

RESULTS

Measurements were made of the intervals within two component groups (d-g and h-j) with the test laser locked to one component and the NPL reference laser locked to another. These groups give totals of twelve and six combinations respectively, with the two lasers locked to different components. The results were used to generate two matrices of frequency intervals, and to calculate the offset between the lasers for each component. The mean offset corresponds to less than 2 parts in 10^{11} . This mean offset is comparable with the standard uncertainty of the reference laser frequency given above.

The measurements show that the iodine-stabilized laser under test emits frequencies in accordance with the values and uncertainties specified* by the International Committee for Weights and Measures, 2001.

*T J Quinn, "Practical realization of the definition of the metre, including recommended radiations of other optical frequency standards (2001)", Metrologia 2003, **40**, 103-33.

Checked by: CSE

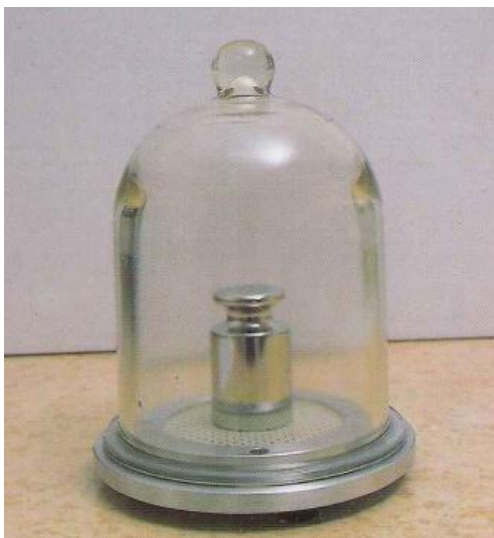
Reference: LL0301/0901

Page 2 of 2

Slika 8.8 - Certifikat primarnog etalona lasera LPCM 2/2

8.2.2 Realizacija definicije kilograma

Definicija kilograma se realizira u Laboratoriju za masu i gustoću, u sklopu Hrvatskog mjeriteljskog instituta. S obzirom da je kilogram posljednja SI jedinica koja je definirana pomoću nekog fizičkog artefakta, a ne pomoću prirodnih konstanti – za definiciju se koriste artefakti kilograma, odnosno maseni etaloni. Državni etaloni od 1 kg su umjereni u BIPM-u a ostali u PTB-u.



Slika 8.9 – Nacionalni etalon kilograma Republike Hrvatske

Laboratorij koristi raznovrsnu opremu, i brojne garniture utega. Posjeduje četiri etalonska utega od 1 kg čije su karakteristike dane tablicom.

Tablica 8.2 – Etaloni kilograma pri Laboratoriju za masu i gustoću (HMI) [23]

	Etalon 1	Etalon 2	Etalon 3	Etalon 4
Masa	1 kg-0,231 mg	1 kg+0,613 mg	1 kg+0,002 mg	1 kg-1,044 mg
$U_c(k=1)$	0,015 mg	0,015 mg	0,015 mg	0,015 mg
$V(20^{\circ}\text{C})$	$124,5342\text{ cm}^3$	$124,8106\text{ cm}^3$	$124,8935\text{ cm}^3$	$124,2186\text{ cm}^3$
α	$48 \times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	$48 \times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	$48 \times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	$48 \times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$

Tablica 8.3 – Mjeriteljska oprema za realizaciju definicije kilograma [23]

Opis	Proizvođač i tip	Mjerno područje	Konvencionalna masa / Mjerna nesigurnost
Komparator mase	Sartorius C 10000 S	2 kg ... 10 kg	0,1 mg
Precizna sonda za mjerjenje temperature/zraka Pt100	Testo AG 06280017	-100 °C ... +400 °C	0,03 °C
Precizna sonda za mjerjenje vlage/temperature	Testo AG 06369741	Vlaga: 0 % ... 100 % Temperatura: -20 °C ... +70 °C	Vlaga: 0,50 % Temperatura: 0,12 °C
Komparator mase	Mettler-Toledo Inc. AX 1006	10 g ... 1 kg	0,002 mg
Precizni uređaj za mjerjenje klimatskih parametara Klimet A30 s integriranom jedinicom za mjerjenje barometarskog tlaka	Meteolabor AG KLA30/P35	600 hPa ... 1100 hPa	0,04 hPa
Klimet A30 integrirana jedinica za mjerjenje rosišta	Meteolabor AG KLA30/DP	Rosište: 0 °C ... 17 °C Relativna vlaga: 20 % ... 80 %	Rosište: 0,05 °C Relativna vlaga: 0,15 %
Temperaturni senzor za Klimet A30	Meteolabor AG T (Cu-CuNi)	15 °C ... 25 °C	0,03 °C
Susceptometar	Mettler-Toledo Inc. UMX5	1 g ... 20 kg	Susceptibilnost: 10 % - 20 %

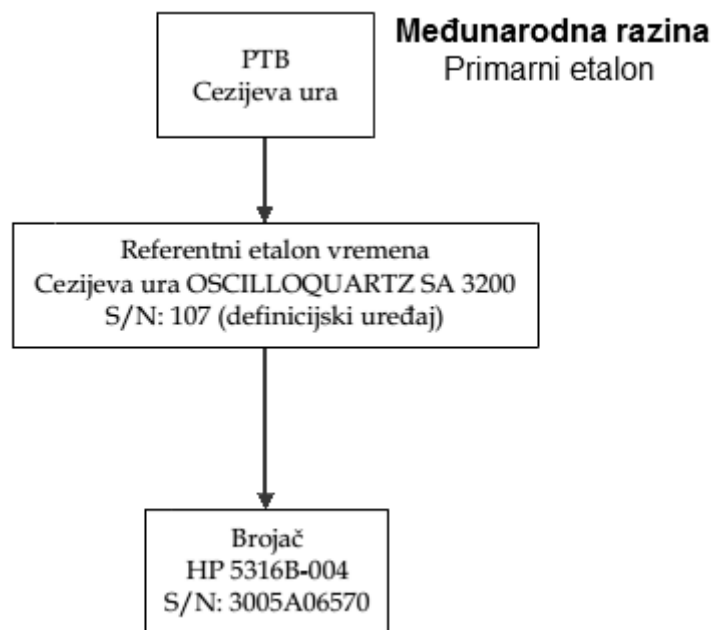
8.2.3 Realizacija definicije sekunde [24]

U ovom području nije ovlašten niti jedan laboratorij kao nositelj nacionalnog etalona, pa akreditirani umjerni laboratoriji osiguravaju ograničene usluge umjeravanja.

Definicija sekunde se u Republici Hrvatskoj realizira u raznim privatnim tvrtkama i na Fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu u Primarnom elektromagnetskom laboratoriju (PEL). Definicijom sekunde se bavi ogranak PEL-ja, Laboratorij za izmjeničnu struju i mjerenja vremena i frekvencije. Laboratorij je 1991. postao vlasnikom prvog cezijevo standarda frekvencije (atomske sate) u Hrvatskoj. Proizvođač uređaja je švicarska tvrtka Oscilloquartz, a model je SA 3200. Etalon vremena je sekundarnog tipa i periodički se umjerava prema cezijevom satu PTB-a pomoću GPS prijemnika Symmetricom 58503B.



Slika 8.10 – Oscilloquartz SA 3200



Slika 8.11 – Sljedivost u sustavu realizacije definicije sekunde RH

8.2.4 Realizacija definicije kelvina [25]

Laboratorij za procesna mjerenja (LPM) je 2002. godine proglašen nositeljem Nacionalnog etalona za temperaturu i tlak, a 2009. godine za vlažnost. Postojeća metoda osiguranja sljedivosti mjerila temperature u LPM-u je sekundarnog tipa. Zasniva se na umjeravanju prijenosnih etalona u Institutu PTB u Berlinu koji eksperimentalno održava Međunarodnu temperaturnu ljestvicu ITS-90 u punom opsegu. Za prijenosne etalone odabrana su dva stabilna etalonska termometra (SPRT) u području od -40°C do 660°C , te dva etalonska termopara tip S (platina/platina 10% rodij) za područje od 660°C do 1050°C . Za mjerenje signala etalonskih termometara i termometara koji se umjeravaju koriste se otporni mostovi i fiksni otpornici, dok se za mjerenje termonapona etalonskih termoparova upotrebljavaju multimetri električnih veličina.

Tablica 8.4 – Glavni dijelovi postojećeg etalona temperature

Mjerno područje		Opis etalona	Proizvođač	Umjerna nesigurnost (k=2)
Temperatura 40 °C do 660 °C	-40 °C do 30 °C 0 °C do 420 °C 420 °C do 660 °C	Etalonski platinski otporni termometar (25 Ω), l=670 mm; d=7 mm, kvarcna cijev	ISOTECH 670 HART 5681	1,2 mK 3,0 mK 5,0 mK
	0 do 440 Ω	Termometrijski most (DC)	Anton Paar MKT 100	0,5 ppm
	Rx/Rt= 0 do 3,9999	Termometrijski most (AC)	ASL F700B	0,4 mΩ
	25 Ω	Etalonski otpornik	Tinsley 5685 25 Ω	2 ppm
	100 Ω	Etalonski otpornik	Leeds & Northrup CAT.4030-B	10 ppm
Temperatura 0 °C do 1200 °C	0 do 1100 1100 do 1200	Etalonski termopar (Typ S) l=750 mm, d=7 mm, keramička zaštitna cijev	IMGC PTB	0,7 K 0,9 K
	10 mV 100 mV	Digitalni multimetar	Keithley– 2001 PREMA 5017	1,57 μV 4,9 μV

LPM je razvio eksperimentalne procedure, matematički model umjeravanja i procjenu mjerne nesigurnosti neophodan za prijenos sljedivosti na sekundarne etalone, radne etalone te mjerila temperature, pomoću navedenih etalona i pomoćne mjerne opreme u području -40 °C do 1050 °C. Metode se zasnivaju na usporedbenom umjeravanju u zonama kontrolirane temperature koje tijekom umjeravanja osiguravaju aksijalnu, radijalu i vremensku stabilnost temperature. U LPM-u su najčešće korištene zone su kupke, termometrijske peći, i fluidizirane kupke.

Postupkom akreditacije kod njemačke akreditacijske agencije Deutsche Kalibrierdienst (DakkS) LPM je dokazao sposobnost umjeravanja etalona sa pripadajućim nesigurnostima u cijelom području akreditacije, čime je ostvarena međunarodna priznatost. Najbolja mjeriteljska sposobnost umjeravanja mjerila temperature sekundarnome metodom (usporedbeno umjeravanje u izotermalnom bloku) prikazuje tablica:

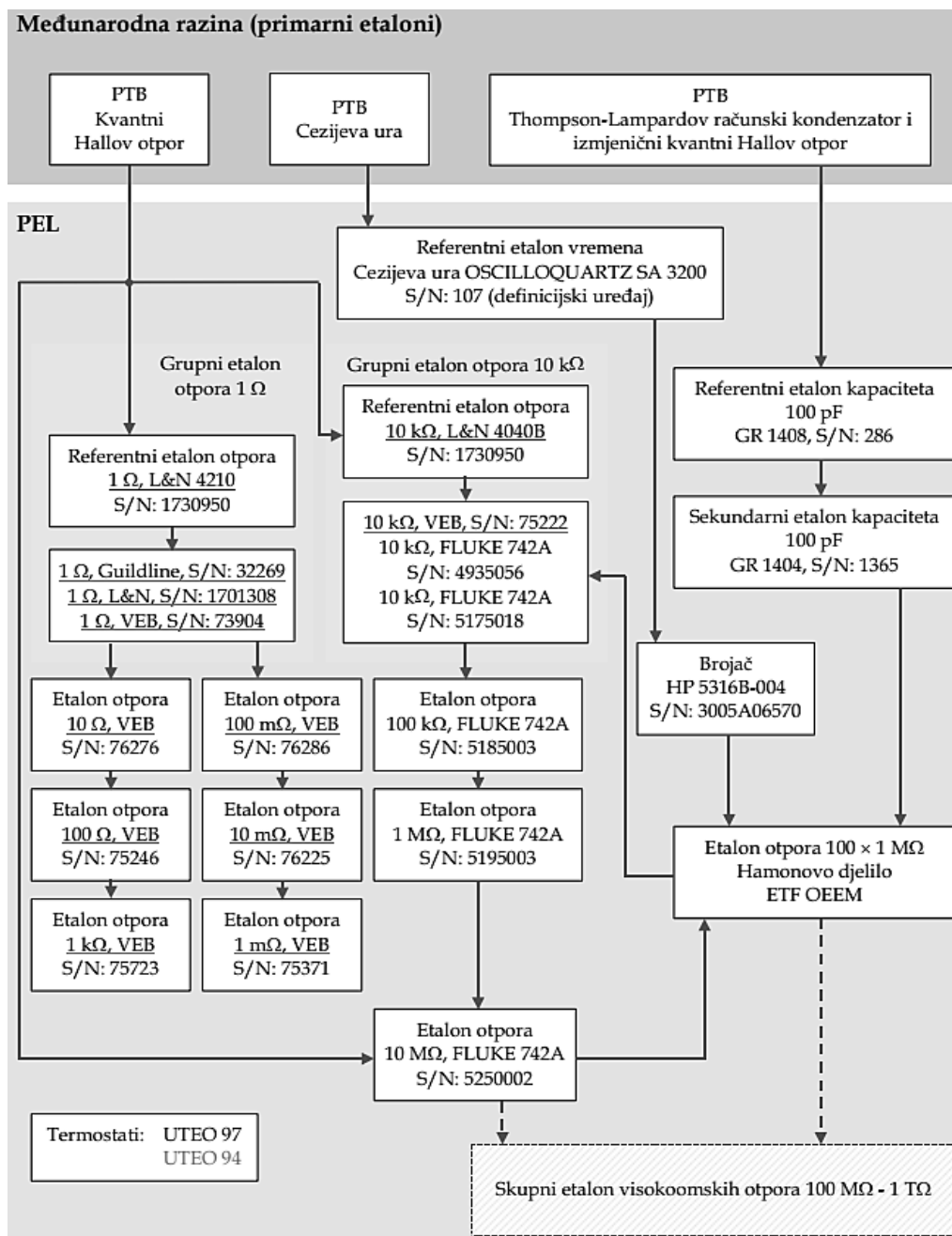
Tablica 8.5 – Mjeriteljske sposobnosti etalona

Mjerilo	Mjerno područje	Uvjeti umjeravanja	Mjerna nesigurnost	Opaska
Otporni termometri, termometri s direktnim očitanjem, pretvornici temperature	0 °C	Ledena kupka	8,0 mK	Sekundarna fiksna točka
	-40 °C do 0 °C	Glikolna kupka	10,0 mK	Usporedba s etalonskim platinskim otpornim termometrom
	0 °C do 95 °C	Vodena kupka	10,0 mK	
	90 °C do 180 °C	Uljna kupka	12,0 mK	
	180 °C do 660 °C	Fluidizirana kupka	100,0 mK	
Termoparovi	0 °C	Ledena kupka	0,2 K	Sekundarna fiksna točka
	-20 °C do 0 °C	Glikolna kupka	0,2 K	Usporedba s etalonskim platinskim otpornim termometrom
	0 °C do 95 °C	Vodena kupka	0,2 K	
	90 °C do 180 °C	Uljna kupka	0,2 K	
	180 do 660 °C	Fluidizirana kupka	0,6 K	
Termoparovi od plemenitih metala, termoparovi s pokazom, termoparovi s pretvornikom	660 °C do 1050 °C	Tunelska peć	1,2 K	Usporedba s etalonskim termoparom
			2,0 K	
Termoparovi od baznih metala	>660 °C do 1000 °C	Tunelska peć	2,5 K	

Daljnji razvoj sekundarne metode prijenosa sljedivosti ide u pravcu smanjivanja utjecaja izotermalnog bloka koji doprinosi s 30% do 90% ukupne mjerne nesigurnosti prilikom korištenja metode usporednog umjeravanja.

8.2.5 Realizacija definicije ampera

Amper se u praksi realizira kroz Ohmov zakon koristeći jedinice elektromotorne sile, električnog otpora i napona; jer je nemoguće realizirati jedinicu prema njenoj definiciji (neizmjereno dugački vodiči zanemarivo malenog kružnog presjeka su neostvarivi). Električni otpor i napon se mogu relativno lako realizirati kroz Josephsonov spoj i kvantni Haalov efekt. Primarni elektromagnetski laboratorij FER-a posjeduje nacionalne etalone otpora i napona. Prikaz sljedivosti laboratorija je dan slikom:



Slika 8.12 – Sljedivost u Primarnom elektromagnetskom laboratoriju

Nacionalni etalon napona je Josephsonov etalon istosmjernog napona od 0 do ± 10 V, frekvencije 75 GHz koji sadrži 19700 Josephsonovih spojeva. Mjerna nesigurnost pri 10 V iznosi $4 \cdot 10^{-9}$ V.



Slika 8.13 – Josephsonov etalona napona pri PEL

Kao etaloni otpora se koriste komercijalno dostupni etaloni Leeds & Northrup 4040B i 4210.



Slika 8.14 - Leeds & Northrup 4040B

9 ZAKLJUČAK

Mjeriteljstvo je danas neizostavno u znanosti, tehnici, pa i društvu, te je ovakav retrospektivni pogled na razvoj mjeriteljstva izuzetno interesantan. Jasno su vidljive sve prepreke koje je čovječanstvo moralo proći da dođe do prve međunarodno priznate mjerne jedinice za duljinu, ali su vidljivi i problemi koji još uvijek (u manjoj mjeri nego prije) koče potpuno prihvatanje mjernih jedinica u nekim državama. Prije svega se to odnosi na prijašnje kolonije Britanskog carstva koje nisu u potpunosti spremne odbaciti redundantne imperijalističke jedinice temeljene na nepraktičnim artefaktima čiji korijeni sežu čak i u godine prije Krista.

SI sustav od svog uspostavljanja zajedno s cijelim mjeriteljstvom evoluirao, i očekuje se odbacivanje i zadnjeg artefakta (kilograma), te potpuni prelazak na definiranje SI jedinica pomoću prirodnih konstanti. Sama evolucija tehnologije koja je prikazana kroz ovaj rad daje naslutiti da će se stvari odvijati brže nego prije, te da se već sada vide pogodnosti koje tehnologije poput nanotehnologije već pružaju, i pružat će u budućnosti, uz potporu (nano) mjeriteljstva.

Republika Hrvatska s druge strane je napravila ogroman iskorak od osamostaljenja, i sada je u području mjerenja duljine u mogućnosti biti na vrhu tzv. mjeriteljske piramide. Kroz nabavku sposobnije opreme, i sređivanje mjeriteljskog sustava vidljivo je da se teži tome da se što više SI jedinica može realizirati na najvišem nivou, što će prvenstveno osjetiti industrija koja sve više teži minijaturizaciji i integraciji na mikro i nano skali. Europska Unija, njeni fondovi i međulaboratorijska suradnja otvaraju nove mogućnosti čiji će se rezultat vidjeti u godinama koje slijede.

10 LITERATURA

- [1] - Lewis, Andrew J; Absolute length measurement using multiple-wavelength phase-stepping interferometry, Imperial College, London, 1994.
- [2] - Runje, B; Doktorska disertacija, Istraživanje mjernih nesigurnosti u postupcima umjeravanja etalona duljine, FSB, Zagreb
- [3] - Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Volume 113, Number 3, May-June 2008.
- [4] - Encyclopedia Britannica,
<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/1286365/measurement-system>; posljednji put pristupano 19.10.2012.
- [5] – History of Measurements, http://www.ayton.id.au/gary/History/H_Meas1.htm; posljednji put pristupano 22.10.2012.
- [6] - Nowlan, Robert A; A Chronicle of Mathematical People,
<http://www.robertnowlan.com/> , posljednji put pristupano 23.10.2012.
- [7] – Loedeman, Janhein, The American Surveyor, January/February 2005.; pogled na knjigu Kevina Aldera – The Measure of All Things
- [8] – Smeaton, William A; The Foundation of the Metric System in France in the 1790s, Platinum Metals Rev., 2000., 44
- [9] – Swindells, Basil, Centenary of the Convention of the Metre, National Physical Laboratory, Teddington, Platinum Metals Rev., 1975., 19
- [10] – Giacomo, Pierre, The Michelson Interferometer, Mikrochimica Acta (Wien), 1987., III, 19-31
- [11] – Fabry Perot Etalons, <http://www.doriclenses.com/produits/104.html>, posljednji put pristupano 30.10.2012.
- [12] – Page, H. Chester, Vigoureux, P., The International Bureau of Weights and Measures 1875-1975, Translation of the BIPM Centennial Volume, 1975.
- [13] – How does a helium neon laser work?; Columbia University of New York, Department of Physics,
http://www.phys.columbia.edu/~w3081/exp_files/melles_griot_1.pdf; posljednji put pristupano 31.10.2012.
- [14] – Ishikawa, J., Portable national length standards designed and constructed using commercially available parts, Sythesiology, Vol.2, No.4, 2009.
- [15] – Riehle, F., Frequency Standards, WILEY-VCH, 2004.

- [16] - Whitworth, J. (April 1856). "The Institute of mechanical Engineers in Glasgow: Chairman's address". Practical Mechanics Journal. 2 1: 173–175.
- [17] – Doiron, T., Gauge Blocks – A Zombie Technology, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Volume 113, Number 3, May-June 2008.
- [18] - Doiron, T; Beers, J.S., NIST Monograph 180 with Corrections, (2005).
- [19] – Cuhadar, D.; The Köster's interferometer for gauge block length measurements
- [20] – Decker, J.E.; Pekelsky J.R.; Gauge Block Calibration by Optical Interferometry at the National Research Council of Canada
- [21] – Državni zavod za mjeriteljstvo; Vrednovanje mjernih podataka – Upute za iskazivanje mjerne nesigurnosti
- [22] – Zvizdić, D; Grgec Bermanec, L.; HMI- Znanstveno i/ili temeljno mjeriteljstvo, Svijet po mjeri, Godina 1., Broj 1., studeni 2012., str. 35
- [23] – Popis etalona, mjerne i pomoćne opreme Laboratorija za masu i gustoću Hrvatskog mjeriteljskog instituta, Oznaka QF 5.5/1-0/1, Izdanje 01, 2011.
- [24] – http://www.fer.unizg.hr/zesoi/o_zavodu/povijest_zavoda i <http://www.fer.unizg.hr/download/repository/pm-P4-PEL-06.pdf> posljednji put pristupano 17.12.2012.
- [25]- Veliki, T., Razvoj primarnog etalona temperature s novom metodom prenošenja sljedivosti, doktorska disertacija, FSB Zagreb, 2011.